



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ OPTICKÉHO MĚŘICÍ
STROJE POMOCÍ LASERINTERFEROMETRU**

DETERMINATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF THE OPTICAL MEASURING MACHINE USING A
LASER INTERFEROMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Silvia Fulová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Bc. Silvia Fulová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Jan Šrámek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení nejistoty měření optického měřicí stroje pomocí laserinterferometru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optické souřadnicové měřicí stroje (CMM) se stávají standardní součástí metrologického vybavení výrobních podniků, kalibračních a zkušebních laboratoří a také studijních i výzkumných organizací. Jsou využívány také pro potřeby národního metrologického institutu ČMI Brno v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Nedílnou součástí provozování těchto CMM je využívání CAD modelů měřených součástí, včetně stanovení nejistoty měření pro dané součásti a jednoduchého návodu pro její výpočet, který bude sloužit pro operátory CMM v praxi.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti měření na optických CMM (rešerše)
Charakteristika zvoleného přístroje a rozbor řešené problematiky
Provedení souboru experimentálních měření při kalibraci
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje
Stanovení nejistoty měření přístroje
Vyhodnocení dosažených výsledků
Závěr a doporučení pro praxi

Seznam doporučené literatury:

SŁADEK, Jerzy A. Coordinate Metrology, Springer Tracts in Mechanical Engineering. Berlín: Springer-Verlag , Německo, 2016, ISBN 978-3-662-48463-10.

ČSN EN ISO 10360-2:2002. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů (ISO 10360-2:2001). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 35 s. Třídící znak 252011.

ČSN EN ISO 17025:2018. Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 48 s. Třídící znak 015253.

EA 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2)). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.

TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s. Třídící znak 83031.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Závěrečná práce sa zaoberá stanovením neistoty optického meracieho prístroja Micro-Vu SOL 311, ktorý sa nachádza na Fakulte strojního inženýrství v Brně. V rešeršnej časti je popísaný prehľad súradnicových meracích strojov (ďalej ako CMM) a analyzovaný súčasný stav optických CMM, tiež je v tejto časti popis základných metrologických pojmov a metodika stanovenia neistoty meracieho prístroja. Ďalšie časti práce sa zaoberajú detailným popisom stroja Micro-Vu SOL 311 a etalónov, ktoré boli použité pri stanovení rozšírenej neistoty merania ako sú koncové mierky, sklenené pravítko a laserinterferometer. V závere práce sa nachádza zhrnutie dosiahnutých výsledkov a odporúčania pre prax.

ABSTRACT

This final thesis is dealing with stating uncertainty of optical measuring device Micro-Vu Sol 311, which is located at Faculty of mechanical engineering in Brno. Overview of coordinate measuring machines (CMM for short) and analyzed present status of optical CMM is in summation. This part also includes basic metrology concepts and methodology of determination of uncertainty of measuring instrument. Content of following parts of thesis is detailed description of Micro-Vu SOL 311 machine and etalons that were used in determination of enhanced uncertainty of measurement such as gage blocks, laser interferometer and glass scale. Last part of this thesis includes summary of achieved results and recommendations for practice.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Optické meracie stroje, meranie dĺžky, neistota merania, presnosť merania, laserinterferometer, koncové mierky, kalibrácia stroja.

KEYWORDS

Optical measuring machines, length measurement, uncertainty of measurement, accuracy of testing, laserinterferometer, gage block, machine calibration

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FULOVÁ, S. *Stanovenie neistoty optického meracieho stroja pomocou laserinterferometra*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2021, 87 s., Vedúci diplomovej práce Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Chcela by som sa z tohto miesta poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Jánovi Šrámkovi, Ph. D. za cenné rady a pripomienky počas vypracovania práce a tiež za pomoc pri jednotlivých meraniach, ktoré sa mohli uskutočniť aj napriek nepriaznivej pandemickej situácii. Tiež by som sa chcela poďakovať mojej rodine, priateľom a známym za podporu počas štúdia a za spríjemnenie niekedy náročných dní. V neposlednom rade ďakujem mojim rodičom, nie len za podporu počas štúdia ale za možnosti, ktoré mi dali, aby som si mohla plniť svoje sny počas celého života.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Jána Šrámka, Ph.D a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 21.5.2021

.....

Bc. Silvia Fulová

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SÚRADNICOVÉ MERACIE PRÍSTROJE	17
2.1	Rozdelenie CMM.....	17
2.2	Konštrukcia súradnicových meracích strojov	19
2.2.1	Meracie systémy	20
2.2.2	Snímacie systémy	21
2.3	Presnosť CMM.....	26
2.4	Kalibrácia súradnicového meracieho stroja	27
3	METROLÓGIA.....	29
3.1	Základné pojmy z metrológie	29
3.2	Metrologický systém v ČR	30
3.3	Právne predpisy v oblasti metrológie.....	32
3.4	Rozdelenie meradiel podľa zákona o metrológií	32
4	NEISTOTA MERANIA.....	33
4.1	Chyba merania	33
4.1.1	Delenie chýb	33
4.2	Neistota merania	34
4.2.1	Štandardná neistota typu A.....	34
4.2.2	Štandardná neistota typu B	35
4.2.3	Kombinovaná štandardná neistota.....	35
4.2.4	Rozšírená neistota.....	35
4.2.5	Presnosť merania a vplyv na výsledok merania	36
4.3	Stanovenie neistoty merania na CMM.....	37
4.3.1	Metóda použitia kalibrovaných objektov alebo etalónov (substitučná metóda).....	37
4.3.2	Ostatné metódy stanovenia neistoty	39
5	POPIS MERACIEHO STROJA A POUŽITÝCH ETALÓNOV	41
5.1	Optický merací stroj Micro–Vu Sol 311.....	41
5.1.1	Optický CCD snímač.....	42
5.1.2	Počítačový softvér Inspec	42
5.2	Sklenené pravítko	45
5.3	Koncové mierky.....	46
5.4	Laserový interferometer.....	47
5.4.1	Princíp.....	47
5.4.2	Laserový interferometer Renishaw XL 80	47
5.4.3	Laser XL – 80	48
5.4.4	Kompenzátor XC – 80 a snímače	48
5.4.5	Lineárne meranie	49
5.4.6	Faktory ovplyvňujúce presnosť v dôsledku zlého nastavenia interferometra pri lineárnom meraní	51
6	PRIEBEH MERANIA	53
6.1	Meranie so skleneným pravítkom.....	53
6.1.1	Postup merania	53
6.2	Meranie koncovými mierkami.....	55
6.2.1	Postup merania	55
6.3	Meranie laserovým interferometrom	56

6.3.1	Nastavenie laserového lúča	56
6.3.2	Prípravok na uchytienie	57
6.3.3	Priebeh merania	58
7	STANOVENIE NEISTOTY MERANIA OPTICKÉHO STROJA MICRO-VU SOL 311.....	60
7.1	Výpočet neistoty typu A – u_A	60
7.2	Výpočet štandardnej neistoty použitého etalónu - u_E	61
7.3	Výpočet vplyvu rozlišovacej schopnosti stroja - u_p	61
7.4	Výpočet štandardnej neistoty dĺžky vplyvom teplotnej rozťažnosti - u_{LT}	61
7.5	Modelový príklad výpočtu neistôt	62
7.5.1	Sklenené pravítko	64
7.5.2	Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania	66
7.5.3	% Podiel príspevkov neistoty k celkovej neistote	67
7.5.4	Koncové mierky	68
7.5.5	Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania	70
7.5.6	Podiel príspevkov k celkovej neistote	71
7.5.7	Laserový interferometer	72
7.5.8	Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania	74
7.5.9	Podiel príspevkov k neistote	74
8	ZÁVER.....	77
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	79
10	ZOZNAM TABULIEK, OBRÁZKOV, SKRATIEK A PRÍLOH	81
10.1	Zoznam tabuliek	81
10.2	Zoznam obrázkov	81
10.3	Zoznam použitých symbolov a skratiek	84
10.4	Zoznam príloh	87

1 ÚVOD

S nárastom konkurencie vo všetkých odvetviach priemyslu sa spája aj zvyšovanie požiadaviek na zrýchľovanie a spresňovanie výrobných procesov či celkovú kvalitu produkcie. Aby bolo možné tento trend zachytiť, meracia technika sa musí neustále zlepšovať. Na trhu je dostatočné množstvo meradiel a voľba toho vhodného pre náš proces záleží len od parametrov, ktoré nám vyhovujú. Niektoré rozmery sme schopní zmerať posuvným meradlom, na niektoré potrebujeme lepšie a precízne meranie, ktoré môžeme doceliť súradnicovým strojom. Vzhľadom na to, že nie všetky predmety, obzvlášť tie krehké, či zložitého tvaru môžeme merať na kontaktných súradnicových strojoch sa do popredia čoraz viac dostávajú optické meracie prístroje.

Súradnicové stroje (Coordinate Measuring Machines – ďalej len CMM) ako kontaktné aj bezkontaktné, umožňujú komplexné meranie výrobkov. Zmerať môžeme skutočný tvar a rozmer výrobku, porovnať tento rozmer alebo tvar s tvarom špecifikácie a následne vyhodnotiť požadované parametre. Ďalšou výhodou súradnicových strojov oproti bežným meracím nástrojom je rýchlosť ako merania tak aj vyhodnocovania parametrov. To z nich robí jednu z najlepších možností merania na trhu.

Aby meranie bolo naozaj presné je potrebné dbať na správne nastavenie stroja. Súčasťou každého merania je rozšírená neistota merania. Zavádza sa pre charakteristiku rozsahu hodnôt, ktoré môžeme priradiť k nameranému výsledku. Chyby merania alebo faktory ovplyvňujúce celý proces merania prispievajú k celkovej neistote merania. Stanovenie neistoty na optickom meracom stroji je hlavným výstupom tejto diplomovej práce.

V prvej kapitole sú popísané typy a druhy súradnicových systémov. Ďalšia kapitola sa zaoberá metrológiou a metrologickým systémom v Českej republike, v ktorom pracovisko metrológie na ÚVSSR VUT FSI hrá nezastupiteľnú rolu. Problematika neistôt meraní a chýb meraní je rozobraná v kapitole č.3. Popis meracieho prístroja a etalónov, či popis jednotlivých pracovných postupov je opísaný v ďalších kapitolách. V závere diplomovej práce je ukážka výpočtu neistoty merania a stanovenie rozšírenej neistoty merania na optickom meracom prístroji.

2 SÚRADNICOVÉ MERACIE PRÍSTROJE

Vznik súradnicových sústav môžeme datovať už do staroveku. Predovšetkým v starovekom Ríme sa súradnicový systém používal pri stavebných prácach alebo pri budovaní vojenských táborov. Postupne, s rozvojom geometrie a trigonometrie, sa začal zavádzať súradnicový systém na určenie jednoznačnej polohy bodov. [1]

Prvý súradnicový stroj vznikol vo škótskej firme Ferranti, približne v roku 1950. Stroj vykonával meranie iba v dvoch osiach a používal sa predovšetkým na presné meranie súčiastok, používaných vo vojenskom priemysle. Prvé 3 - osové modely sa objavili už o 10 rokov neskôr v Taliansku a o ďalšie desaťročie, teda v roku 1970, sa v USA objavili aj stroje ovládané počítačom. Medzi prvých výrobcov SMS môžeme zaradiť dodnes fungujúcu firmu Zeiss, ktorá na trh priniesla prístroj UMM 500. Prístroj mal vlastnú meraciu sondu, integrovaný stôl a vlastný merací softvér UMESS. Táto dovtedy neznáma, ale prepracovaná technológia umožnila prvý krát merať komponenty v troch osiach. [1], [2]

V súčasnosti našli súradnicové stroje široké uplatnenie. Sú bežnou a zároveň neoddeliteľnou súčasťou v rôznych odvetviach priemyslu či v laboratóriách.

2.1 Rozdelenie CMM

Na trhu môžeme nájsť rôzne súradnicové stroje; od malých prístrojov až po veľké mostové systémy. Majú rôzne stupne automatizácie, od manuálnych až po plne automatické. Odhliadnuc od výnimiek všetky využívajú konštrukčné riešenie s polohovaním v kartézskej (polárnej) súradnicovej sústave. [3], [4]

Podľa konštrukcie delíme súradnicové stroje na 4 základné skupiny:

- Jednosúradnicové

Meranie na týchto strojoch prebieha len v smere jednej osy a používajú sa na absolútne meranie väčších vzdialeností. Ich konštrukcia pozostáva zo stojana, hmotnej miery, dotykového alebo zameriavacieho zariadenia. Pomocou týchto strojov sa dá doceliť malá chyba meradla 0,6 až 6 μm v celom meracom rozsahu. Táto chyba platí aj pri meraní veľkých rozmerov. Väčšina jednosúradnicových strojov sú dĺžkomery. [3]

- Dvojsúradnicové

Rozmery meraného objektu sa na tomto stroji merajú na základe dvoch navzájom kolmých osí „x“ a „y“ v jednej rovine. Tieto stroje obsahujú tiež dĺžkové a uhlové zariadenia, určené na zložitejšie meranie. V 2D meraní ich využívame ako mikroskopy, profilprojektory alebo laserové interferometre a skenery. [3]

- Trojsúradnicové

Meracie stroje sú určené na zložitejšie meranie v priestore v troch navzájom kolmých súradniciach. Meranie prebieha v smere osí „x“, „y“ a „z“. Pomocou trojsúradnicových meracích prístrojov môžeme zmerať vzdialenosť medzi ľubovoľnými bodmi, výpočet streda a priemeru daného objektu či zistenie kolmosti a rovnobežnosti. Tieto meracie stroje predstavujú vrchol merania geometrických veličín. [3]

- Multisenzorové súradnicové meracie stroje

CMM tohto typu využívajú rôzne typy meracích sond, ako napríklad sú: optická sonda, mikrosonda, mechanický snímač a i. Často disponujú súčasne optickými aj dotykovými senzormi. Tieto typy meracích sond sa používajú spravidla súčasne, čím je možné na stroji riešiť komplexné meracie úlohy. Zvyčajne ich môžeme nájsť v dvoch prevedeniach ako stacionárne (napr.: tomograf) alebo mobilné (napr. FARO). [3], [10]

Okrem konštrukčných vlastností, môžeme CMM rozdeliť aj podľa geometrického usporiadania. Podľa normy ČSN EN ISO 10360 – 1:2001 sa podľa tohto usporiadania stroje delia do 4 základných kategórií:

- Výložníkový typ

Vyznačuje sa dobrým prístupom k meranej súčasti. Medzi jeho nevýhody patrí malá kapacita meracieho priestoru. Týmto typom SMS (obr. 1a) sa zvyčajne kontroluje menší a stredný rozmer obrobkov. V niektorých konštrukciách môžeme nájsť aj dva výložníky o sebe, pričom môžeme hovoriť o zdvojenom výložníkovom type. [4], [5]

- Stojanový typ

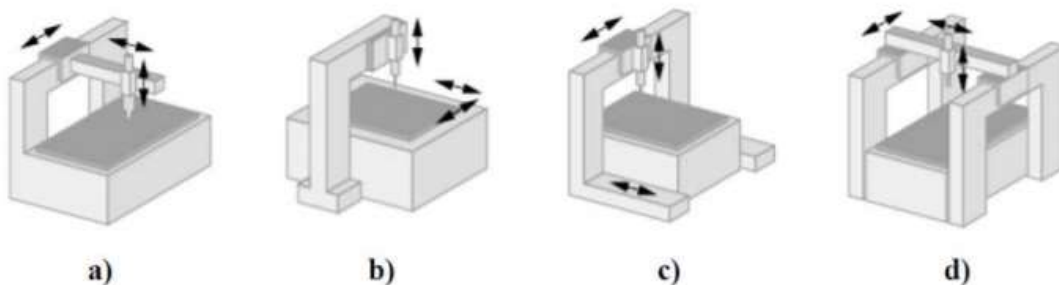
Stojanový typ (obr. 1b), sa prevažne využíva na meranie malých rozmerov. Meraný predmet je upnutý na stôl, ktorý sa pohybuje v smere osi „x“ a „y“. Merací snímač sa pohybuje v smere osi „z“. Tieto stroje sa využívajú na laboratórne meranie. Ak docielime dobrú prístupnosť k meranému objektu, dosiahneme aj lepšiu presnosť. V prípade, že konštrukcia obsahuje aj deliaci stôl, môžeme merať aj vo valcových súradniciach. [4], [5]

- Portálový typ

Medzi výhody tohto typu patrí dobrá tuhosť a hlavne presnosť, nevýhodou je zase horší prístup k meranému objektu. Môže mať pevný alebo pohyblivý portál, od čoho sa potom odvíja aj pohyblivosť stola, pri pevnom portáli je stôl pohyblivý (pohybuje sa v ose „x“) pri pohyblivom naopak nie je. Tento typ meracieho stroja (obr. 1c), sa používa na meranie menších a stredných rozmerov a v praxi sa využíva najviac. [4], [5]

- Mostový typ

Tento typ stroja na obr. 1 d), sa najčastejšie využíva v automobilovom a leteckom priemysle. Dajú sa s ním zmerať veľké rozmery, presnosť merania je však naopak nižšia ako pri iných typoch strojov. Konštrukcia stroja musí byť navrhnutá tak, aby bolo možné odberať veľké rozmery objektov. Merací rozsah v ose „x“ môže dosiahnuť aj viac ako 24 m. [4], [5]



Obr. 1) Typ súradnicových strojov: a) Výložníkový, b) Stojanový, c) Portálový d) Mostový [3]

2.2 Konštrukcia súradnicových meracích strojov

Základ konštrukcie SMS tvoria vodiace plochy a priame dosky. Na tieto prvky sú kladené vysoké požiadavky v dosiahnutí rovinnosti a kolmosti. Medzi ďalšie časti, z ktorých sa skladajú súradnicové meracie stroje sú : základňa (rám), stojan, portál, most a pinola. [4]

Základňa (rám)

- Musí spĺňať vysoké nároky na tuhosť pri dynamickom zaťažení. Pri meracích strojov veľkých rozmerov sa rám nevyskytuje, je nahradený vlastnou základovou doskou, ktorá je umiestnená v podlahe. [4]

Stôl

- Na uskutočnenie presného merania je povrch stola obvykle vyrobený zo žuly alebo granitu. Kamenná doska sa nedá len tak ľahko poškrabať, zmena jej tvaru je počas životnosti len veľmi malá, nepodlieha korózií, je ľahko opraviteľná pri prípadnom poškodení a preto sa dá stabilne dlhodobo používať. [4]

Mostné konštrukcie, portály, stĺpy

- Vyrábajú sa zvarené ako jeden celok. Konštrukcia musí byť dostatočne tuhá a rozmerovo aj tvarovo stála. [4]

Pinola

- Vyrába sa z ocele alebo prírodného kameňa, zvyčajne ako vertikálne alebo horizontálne kruhového či štvorcového prierezu. Pri použití horizontálnej pinoly môže dôjsť k pohybu pri vyložení, poprípade zaťažení snímačej hlavy. V tomto prípade je nutné dbať na správne dimenzovanie. Vyvažovacie zariadenia, obvykle dve súmerné závažia sa používajú na kompenzáciu prípadných pohybov. Pinola býva vyrobená z latinovej alebo duralovej tyče. [4]

Vedenie

- Patrí k dôležitým súčastiam súradnicových strojov. Zariadenia musí byť konštruované tak, aby sa pohyblivé časti mohli ľahko posúvať, pričom si zachovávajú maximálnu presnosť. Na vedenie sú uložené pohyblivé časti čo s najmenším trením, minimálnym opotrebovaním a maximálnou tuhosťou. Najvhodnejším a jedným z najčastejšie využívaných vedení pri SMS sú valivé vedenia, na guľkách alebo valčekoch. Pohyb v tomto prípade je rovnomerný. Ďalšou výhodou je aj veľmi malé trenie. K nedostatkom tohto usporiadania patrí zložitosť ich presného zhotovenia. Medzi najjednoduchšie riešenia patrí uloženie cez presné kladky, dokonalejšie uloženie predstavujú valivé hniezda, pri ktorých sa vylučuje vplyv mikronerovností. Medzi ďalšie uloženie patrí aerostatické uloženie. Toto uloženie umožňuje vzájomný pohyb jednotlivých častí bez trenia po vzduchovom vankúšiku, ktorý má šírku 4 až 8 μm . Medzi výhody tohto uloženia patrí napr.: minimálny odpor, žiadny trhavý pohyb, tuhosť a tiež je potlačený vplyv nepresnosti povrchu. Posledné možné uloženie je klzné uloženie. Toto uloženie sa v súčasnosti už skoro vôbec nevyužíva. Hlavnou nevýhodou je veľký odpor a teda nutnosť neustáleho mazania, kde potom vzniká problém s mazacou sústavou – zvodom oleja, tesnením a odvodom tepla. Medzi výhody môžeme zaradiť veľkú tuhosť, kvalita vedenia sa časom zvyšuje, čím sa zvyšuje aj presnosť zariadenia. [4], [7]

2.2.1 Meracie systémy

Vďaka meracím systémom dokážeme získať súradnice snímaných bodov v kartézskych (polárnych) súradniciach. Meracie systémy výrazne ovplyvňujú presnosť súradnicových strojov. Periodická chyba mierky a tiež rozlišovacia schopnosť sa podieľajú na presnosti výsledku. Medzi najčastejšie používané dĺžkové meracie systémy, vyobrazené na obr. 2 u CMM patria: [4]

- Závitový hriadeľ s uhlovým prevodníkom

Zvyčajne sa vyrába do dĺžky 1,2 m. Aby bola zaistená tepelná stabilita je uložený v olejovom kúpeli. Tvar závitú je zvyčajne lichobežníkový. Medzi nevýhody tohto meracieho systému patrí chyba reverzibility. [4]

- Lineárny induktosyn

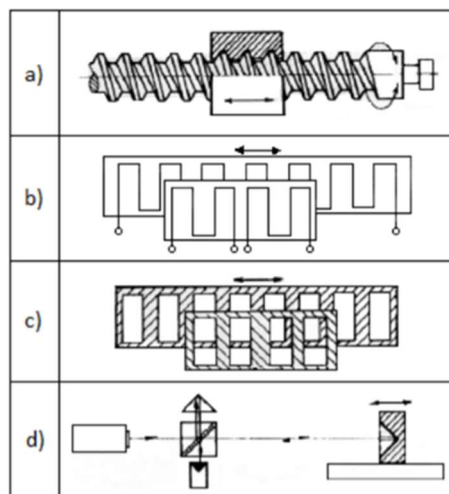
Základná mierka je tvorená vodičom, ktorý má tvar meandru a je napájaný na striedavý prúd. Dĺžka jednej vlny meandru je 2 mm. Po základe sa pohybuje jazdec s dvomi slučkami podobného meandru. Ich vzájomná diferencia je 0,5 mm. Napätia, indukujúce sa na slučkách sú dve, vzájomne fázovo posunuté o 90°. Výhodou induktosynu je, že je odolný a nevyžaduje špeciálnu údržbu. [4]

- Inkrementálna dĺžková stupnica

Patrí k najpoužívanejším meracím systémom CMM pre meranie dĺžok. Základná stupnica je na sklenom podklade, má rozlíšiteľnosť 1 μm . Striedajú sa na nej polia prepúšťajúce a neprepúšťajúce (odrážajúce) svetlo. Jazdec má 4 polia, ktoré svetlo prepustia, z toho sú dve polia posunuté o štvrtinu rozteči. Vzdialenosť rysiek je $0,01 \div 0,04$ mm. Natočením jazdca o nepatrný uhol môžeme dosiahnuť rozlíšiteľnosť až 0,1 μm . Výhodou tohto druhu meracieho systému je ľahká kalibrácia, docieliteľná náklonom jazdca. [4]

- Laserinterferometer

Zvyčajne sa u CMM používajú na kontrolu presnosti a kalibráciu. Sú to pomerne drahé a citlivé zariadenia, s rozlíšiteľnosťou až 0,01 μm . Systém využíva laser s rozdeľovačom lúčov, ktorý vykonáva mimoriadne presné merania na základe odrazeného laserového svetla. Toto svetlo vytvára interferenčný obrazec a pomocou počítačového softvéru sa zmerajú pohyby stroja. [6]



Obr. 2) Typ meracích systémov: a) merací hriadeľ, b) lineárny induktosyn, c) inkrementálna dĺžková stupnica d) laserový interferometer [4]

2.2.2 Snímacie systémy

Slúžia k nasnímaniu meraných bodov. Tieto body sú s pomocou meracieho programu vyhodnotené a následne získame numerickú informáciu o meranej veličine. Spôsob, akým sú jednotlivé body zmerané ovplyvňuje presnosť a automatizáciu merania. Snímací systém sa nachádza na konci pinoly, medzi jeho základné časti patrí: [4]

- Snímacia hlava
- Predĺženie snímačej hlavy
- Systém výmeny snímacích hláv
- Snímacie dotyky
- Systém výmeny snímacích dotykov
- Predĺženie snímacieho dotyku

Snímacie hlavice rozdeľujeme na pevné, dosahujú väčšiu presnosť, ale nedajú sa v priestore otáčať a indexovateľné, snímacie sondy sa dajú presne polohovať. Indexovateľné hlavice sa ďalej delia na: [8]

Motorické – zmena orientácie sondy je automatická a opakovateľná. Optimálna poloha sondy umožní lepší prístup k meraným prvkom a zlepšuje možnosti meracieho prístroja a maximalizuje produktivitu merania. Opakovateľnosť hlavice umožňuje nastaviť polohy opakovateľne bez nutnosti rekvalifikácie. Týmto môžeme ušetriť merací čas, optimalizovať orientáciu sondy a tiež docielime najlepšiu presnosť merania. [8]

Manuálne – nastavujú sa ručne. Používajú sa predovšetkým na meranie zložitých tvarov na povrchu kontrolovaných súčiastok. [8]

Na základe metódy získania informácií o meranom predmete rozdeľujeme snímacie systémy na dotykové a bezdotykové. Rozdiel medzi týmito typmi snímačov je v spôsobe získania informácií.

Dotykové snímacie systémy

V momente nasnímania bodu, dá softvér povel obsluhu nasnímať a zaregistrovať všetky súradnice. Po ukončení merania, tieto nasnímané súradnice vypočíta a vyhodnotí požadované geometrické veličiny (napr.: priemer kružnice, súradnice stredu, a pod.) [4]

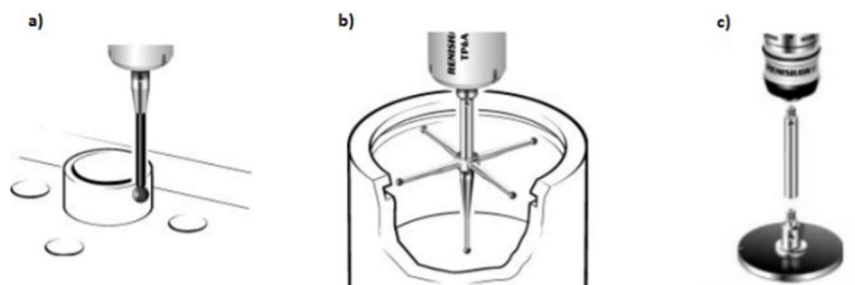
Meracie dotyky

Snímacie dotyky sprostredkovávajú kontakt medzi sondou a meranou súčiastkou. Signál, ktorý je vygenerovaný umožní zaznamenať súradnice nasnímaného bodu. V závislosti na snímanom prvku sa volí aj typ a rozmer dotyku. Medzi najdôležitejšie vlastnosti dotyku patrí tuhosť a dokonalý tvar guľičky. Pri výbere guľičky by sme mali dbať na to, aby dotyk bol čo najkratší a aby bol čo najmenší počet predlžovacích nástavcov, čím predídeme vzniku väčšieho počtu nepresností. Naopak, priemer guľičky by mal byť čo najväčší, čím sa zvýši tuhosť dotyku. Na výrobu guľičky sa najčastejšie používa rubín, nitrid kremíka alebo diamant. [7]

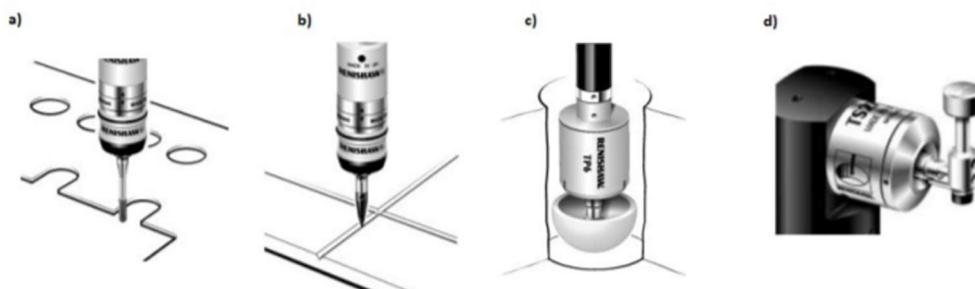
Typ dotyku

- Priamy – na obr. č. 3a, ide o najjednoduchší tvar. Skladá sa z presnej guľičky a stopky.
- Hviezdicový – , na obr. 3b umožňuje snímanie zložitých prvkov, otvorov vďaka konfigurácii dotykov. Stopky so 4 alebo 5 guľičkami sú pevne pripojené k strednému dielu.
- Diskový – na obr. 3c najčastejšie sa používa pri snímaní drážok a zápichov, keď sa nedá použiť hviezdicový dotyk. Spôsob merania je podobný, ako pri meraní s veľkým dotykom, ale pre kontakt je využitá len malá časť povrchu.
- Dotyky pre špeciálne účely – patria sem:
 - Valcový dotyk
 - Špička
 - Dutá keramická pologuľa
 - Dotyk na zastavenie nástrojov

Pri predĺžení dotyku pomocou predlžovacích nástavcov sa zníži tuhosť dotyku a to vedie k zníženiu presnosti merania. [4]



Obr. 3) Typ meracích dotykov: a) priamy, b) hviezdicový, c) dotykový[6]



Obr. 4) Typ špeciálnych dotykov - a) valcový dotyk b) špička c) dutá keramická pologuľa d) dotyk na zastavenie nástrojov[4]

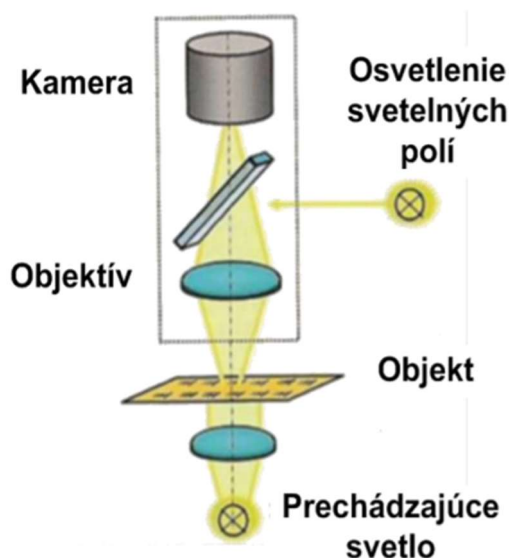
Bezdotykové snímacie systémy

Na bezdotykové meranie obvykle potrebujeme rôzne svetelné zdroje. Aspoň jednu šošovku, zdroj svetla a detektor. Od dotykových senzorov sa líšia tým, že namiesto použitia hmatového merania používa na výpočet detekcie hrán buď referenčný bod alebo počítač. Medzi typických predstaviteľov tohto merania sú optické systémy, použité v dvojsúradnicových strojoch v automatických meraciach mikroskopoch, ktoré pracujú v rovinách ako dvojsové meracie systémy. Na podobnom princípe pracujú aj 3D CMM a multisenzorové súradnicové stroje. [4]

V minulosti, bolo jediným dostupným optickým senzorom ľudské oko. S rozvojom vedy a techniky, prebrali funkciu oka optoelektronické senzory. Pri meraní, môžu meraný objekt merať kolmo alebo pozdĺžne k meranej osi. Výhody bezdotykových senzorov sú v možnostiach merania. Optickým snímačom môžeme zmerať malé krehké kusy či dielce s malými prvkami. Umožňuje vyhnúť sa obtiažnemu nastavovaniu malých a elastických dielov. Senzory, ktoré spracovávajú obraz merajú obvykle celú škálu meracích bodov veľmi rýchlo alebo dokonca súčasne, čím sa výrazne zrýchľuje proces merania. [9]

Senzory spracovania obrazu:

Vďaka objektívu sa meraný objekt zobrazí na matricovej kamere. Pomocou elektroniky sa optické signály prevedú na digitálny obraz, vďaka ktorému je možný výpočet meraných bodov vo vhodnom vyhodnocovanom softvéri. Výkonnosť týchto senzorov môže ovplyvniť osvetlenie, použitý čip senzora, elektronika či algoritmus výpočtu. Princíp spracovania obrazu je zobrazený na obr. č. 5 [11]



Obr. 5) Senzor spracovania obrazu [10]

Formy senzorov spracovania obrazu na CMM:

CCD Kamera

CCD snímače sú využívané v kamerách už niekoľko desiatok rokov. Oproti CMOS snímačom majú niekoľko výhod, napríklad lepšiu svetelnú citlivosť. Táto vlastnosť sa najlepšie prejaví pri horšom osvetlení, kedy dostávame lepšiu kvalitu obrazu. Vyrábajú sa špeciálnym neštandardným procesom a preto je ich cena vyššia ako pri CMOS snímačoch. Sú horšie zabudovateľné do kamery. V prípade príliš svetlého objektu (priame slnečné svetlo), môžeme

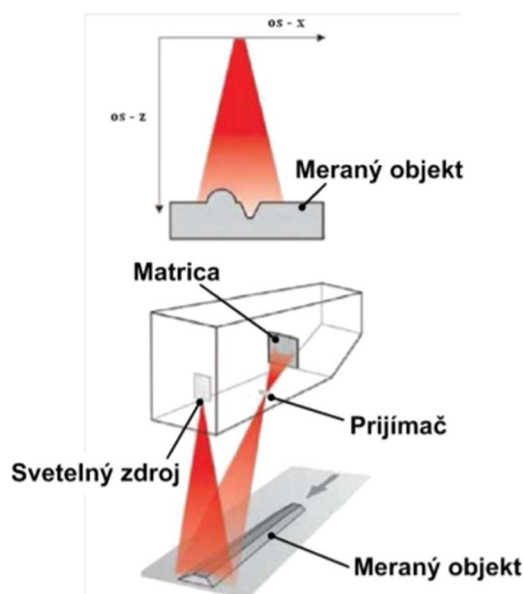
na obraze pozorovať škvrnu. Tento jav spôsobí čiastočné „roztečenie“ snímača a vytvorenie pruhov nad a pod objektom. Ich veľkou výhodou oproti konkurenčným čipom je dobrá metrologická kvalita. Túto kvalitu ovplyvňuje lineárny vzťah medzi vstupným a digitálnym výstupným signálom či softvér, v ktorom sa vyhodnocujú merané body. Ten môže byť koncipovaný do dvoch druhov: „Edge Finder“ (vyhľadávač hrán) a spracovanie obrysového obrazu. Pomocou prvého sa zisťujú priesečníky priamok, ktoré sú v obraze vopred definované s viditeľnými obrysmi objektu. Vďaka postupne sa opakujúcemu procesu na mnohých, vopred určených miestach vznikne dostatočné množstvo meraných bodov, ktoré sú zlúčené do skupiny. Pri spracovaní obrysového obrazu sa vyhodnocuje obraz ako plošný celok. Matematickými algoritmi sa z neho extrahujú obrysy, ku ktorým je pridaný meraný bod. Tieto body sú radené za sebou. Vďaka tomuto princípu, môžeme predísť rušivým vplyvom a včas ich odfiltrovať, bez toho aby sme zmenili tvar. Bližší popis tejto technológie je v kapitole 4. pri popise stroja Micro–Vu Sol 311. [10], [11], [13]

CMOS Kamera

CMOS snímače sú vyrábané štandardnou metódou, ktorá sa využíva aj pri výrobe pamäťových čipov. Pokrokom v technológii sa pomaly približujú k technicky kvalitnejším CCD snímačom. Momentálne však stále nie sú vhodné pre kamery, kde je požadovaná najvyššia kvalita obrazu. Rozdiel v kvalite obrazu je predovšetkým viditeľný pri zlom osvetlení. Keďže tieto snímače nemajú takú svetelnú citlivosť, pri zhoršených podmienkach osvetlenia môžeme dostať tmavý obraz plný šumu. CMOS snímače sa v súradnicovej technike využívajú napríklad do malých a prenosných mikroskopov (obr. č.10), najčastejšie ich však môžeme nájsť v fotoaparátach. [11], [13]

Laserový senzor

Pri bodovom laserovom senzore sa na meraný objekt premieta svetelný lúč (obr. 6) vytvorený laserom. Optoelektrický senzor zachytí a zobrazí odrážajúcu sa svetelnú škvrnu. Vhodným postupom sa potom vytvorí poloha meraného bodu. Väčšina metód laserového snímania spadá do interferometrickej alebo triangulačnej metódy. [10]



Obr. 6) Princíp laserového senzoru [11]

Obrovské množstvo bodov, ktoré je získané laserovým skenerom je filtrované na trojuholníkovú sieť, ktorá sa používa na výpočet rozmerov súčiastky. Laserové skenovanie sa využíva na 3D model súčiastky neznámeho tvaru alebo komplexné porovnanie naskenovanej súčiastky s jej modelom, ktoré nemôžu byť merané dotykovou formou merania. Nevýhodou je citlivosť na lesklé plochy, ktoré v prípade skenovania, musia byť upravené špeciálnym postrekom. [10], [11]

Najčastejšie formy snímania u CMM:

- Laserové systémy

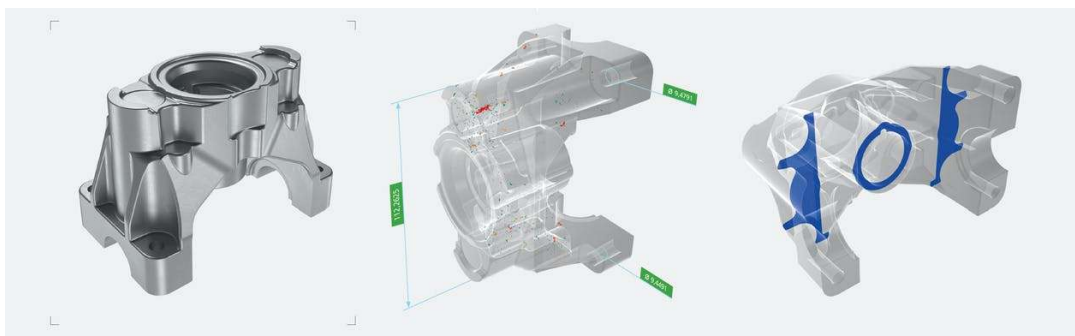
Využívajú sa dva rôzne lúče, ktoré sa pretnú v presne definovanej vzdialenosti. V momente, keď dôjde na meracom povrchu k prieniku týchto lúčov, tak vyhodnocovacia jednotka stroja zaregistruje dotyk. Pri laseri môžeme skenovať v jednej alebo troch rovinách. Laserové skenery (obr. 7), dokážu zachytiť najmenšie detaily s vysokou presnosťou pri zachovaní všetkých potrebných parametrov (rýchlosť, kvalita údajov) [4]



Obr. 7) Laserové meranie, laserový snímač LC15Dx od firmy NIKON [12]

- Počítačová tomografia

Je to pomerne nová, rozvíjajúca sa metóda. Využíva sa predovšetkým v oblasti medicíny na diagnostiku vnútorných orgánov, ale rozšírila sa aj do oblasti strojárstva. Je to vhodná technológia na nedeštrukčné vyhodnotenie kvality mnohých výrobkov. Vďaka počítačovej tomografii môžeme skontrolovať materiál, poprípade nájsť chyby vo vnútornej štruktúre materiálu, skontrolovať geometriu a funkčnosť zostavených dielov či zmerať rozmer v nedostupných oblastiach. Príklad kontroly ľahkého kovového dielu týmto tomografom je na obrázku č. 8. [7], [15]



Obr. 8) Kontrola kvality dielu pomocou počítačovej tomografie[6]

- Kamerové systémy

Pomocou optickej kamery sa prenesie optický signál na digitálny obraz, ktorý sa použije k výpočtu meraných bodov vo vyhodnocovacom programe. Objekt sa nasvieti a pomocou

objektívu sa prenesie na senzor. Medzi najčastejšie optické snímače patria CMOS a CCD snímač. Systém optického snímania CCD využíva aj merací prístroj, na ktorom prebiehalo stanovenie neistoty. [4]



Obr. 9) Zeiss Viscan – zariadenie využívajúce CCD snímač[13]



Obr. 10) Dino – Lite – zariadenie využívajúce CMOS snímač[16]

2.3 Presnosť CMM

Vzhľadom na zložitosť konštrukcie CMM sa môžeme stretnúť s veľkým množstvom zdrojov možných chýb merania. Medzi najvýznamnejšie zdroje chýb u CMM môžu byť:

- **Nevhodné podmienky okolia** – chvenie alebo kolísanie teploty
- **Chyby súradnicového systému** – deformácia stroja, chyba priamosti
- **Chyby snímacieho systému** – linearita alebo hysterézia
- **Chyby meranej súčiastky** – povrch alebo hmotnosť
- **Chyby meracieho systému** – chyby mierky alebo zostavenia meradla na referenčnú hodnotu.

Na presnosti CMM sa podieľajú všetky prvky celého systému. Výrobca musí sledovať presnosť jednotlivých prvkov stroja, zatiaľ čo používateľ sa zaujíma výslednú presnosť celého systému. Skúšobné metódy ako si overiť presnosť CMM môžeme rozdeliť do dvoch kategórií a to: analytické, kedy zisťujeme presnosť po komponentoch alebo globálne, pomocou etalónov a skúšobných telies. [4]

Výhodou globálnej metódy je jednoduchosť a relatívna krátkosť skúšok. Metóda je založená na použití etalónov a skúšobných telies ako napr.: lineárne, plošné, priestorové alebo kombinované etalóny. Medzi lineárne môžeme zaradiť koncové mierky, ktoré sa dajú využiť samostatne alebo ako zostava o viacerých rozmerov. Slúžia na kontrolu stroja v jednotlivých osiach. Plošné etalóny sú dosky s guľami (ball plate) alebo s otvormi (holeplate). S týmito etalónmi sa dá urobiť kalibrácia vo dvoch horizontálnych a vertikálnych rovinách. Kalibrácia priestorovými etalónmi je vzhľadom na ich variabilitu dosť náročná a vyžaduje si následné overenie.[4]

Faktory, ktoré ovplyvňujú meranie na CMM a prispievajú svojimi zložkami k výslednej neistote merania prístroje môžeme rozdeliť na:

- **Vplyv meracieho prístroja** – do úvahy sa musí brať vnútorné nedostatky ako napríklad sú:
 - Nepresnosť výroby jednotlivých elementov
 - Nepresnosť montáže prevodových systémov
 - Deformácie
- **Vplyv okolia** - Teplota pri kalibrácii má významný vplyv na rozmer, preto sa odporúča dôsledne dodržiavať teplotu v laboratóriu $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- **Vplyv objektu merania** - na výsledok merania má vplyv aj charakteristika meracieho objektu . Patria sem:
 - Charakteristika povrchu
 - Tvrdosť
 - Elastická a plastická pružnosť
- **Vplyv obsluhy a stratégie merania** - pri samotnom meraní nemôžeme zabudnúť že k výslednej neistote prispieva aj správnosť meracieho postupu. Je potrebné na začiatku merania si nastaviť správny postup, ktorý by sa mal dodržiavať počas celej kalibrácie prístroja. Jednotlivé postupy môžu zvyšovať alebo znižovať neistotu merania. [4]

2.4 Kalibrácia súradnicového meracieho stroja

Kalibrácia je podľa VIM, definovaná ako činnosť, ktorá stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny a neistotami merania poskytnutými etalónmi a odpovedajúcimi indikáciami s neistotami merania v prvom kroku a následne tieto informácie použije k stanoveniu vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie. Celý proces musí byť vykonaný za špecifikovaných podmienok. [17]

CMM sa dá klasifikovať ako merací systém aj merací stroj, hlavne vďaka zaskomponovaniu troch a viacerých dĺžkových meradiel, snímačov tepla a iných ďalších pomocných meradiel. Hlavnou činnosťou stroja je meranie dĺžky, preto bude popis kalibrácie riešený len na túto veličinu. [41]

V prvom kroku je potrebné zistiť chyby vedenia snímacieho systému vo všetkých smeroch súradnicových osí v závislosti na polohe v rozsahu každej súradnice. Mechanizmus má 6 stupňov voľnosti v každom smere pohybu. V ose X sú to napríklad 3 funkcie rotačných chýb (R_{xy} , R_{xx} a R_{xz}), dve translačné chyby (T_{xy} , T_{xz}) a funkcia nelinearity pravítka (L_{xx}). [32] V závislosti na rozsahu konkrétnej meracej ose sa urobí meranie s krokom 10, 20, 50, 100 alebo 200 mm (väčší sa nepoužíva). Akonáhle sú určené chybové funkcie vo všetkých smeroch os je nutné zistiť chyby pravouhlosti vedenia φ_{xy} , φ_{xz} a φ_{yz} . Tento krok zjednoduší matematické výpočty. [41]

Po zistení všetkých chýb je možné zahájiť druhý krok kalibrácie. Tento krok spočíva v zadaní konštánt do priestorovej matice, ktorá sa nazýva „mapa korekcií“. Matica, musí byť zapísaná na príslušný hardware, aby sme ju boli schopní použiť. Tento úkon môže vykonať spravidla len výrobca alebo autorizovaný servisný zástupca a nie kalibračné laboratórium.

Ani dvoj kroková kalibrácia nie je zárukou, že výsledky budú spĺňať požiadavky metrologickej nadväznosti, alebo že CMM bude metrologicky spôsobilý a v zhode so špecifikáciami. Preto by malo nasledovať overenie kalibrácie. [41]

Ku kalibrácií bývajú najčastejšie využívané hmotné dĺžkové etalóny, teda koncové mierky. V prípade prístroja s optickým snímaním je vhodné použiť sklenené pravítka, sklenené mriežky alebo priemyslový interferometer. Pre multisenzorové CMM sú etalóny vyberané v závislosti na konštrukcii. [41]

3 METROLÓGIA

Metrológiu definuje medzinárodný metrologický slovník VIM ako vedu o meraní. Meranie patrí k jednému z najdôležitejších prvkov pri rozhodovaní sa podnikateľov, spotrebiteľov občanov či politikov v rôznych oblastiach života. Meranie je všade prítomné a okrem využitia v priemysle má tiež nenahraditeľnú úlohu pri transakciách medzi ekonomikami. [17], [18]

Metrológia sa delí na tri hlavné kategórie

- **Vedecká metrológia** - jej úlohou je predovšetkým realizácia a uchovávanie etalónov. Tiež sa zaoberá odovzdávaním hodnôt meracích jednotiek na meradlá a etalóny nižších rádov.
- **Priemyslová metrológia** – zabezpečuje používanie vhodných meradiel či meracích metód na úrovni priemyslových podnikov, služieb či ostatných organizácií.
- **Legálna metrológia** – zaoberá sa meracími procesmi z hľadiska ochrany obchodného styku, spotrebiteľa a ďalších oblastí verejného záujmu. [18]

3.1 Základné pojmy z metrológie

Pojmy a definície vzťahujúce sa k téme presného merania na súradnicových strojoch:

Správnosť merania – Tento pojem je len kvalitatívny a podľa VIM udáva tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu meraní a pravou hodnotou nameranej veličiny. Je kvalifikovaný charakteristikami priemeru ako sú stredné hodnoty, polohy. Ovplyvňuje systematickú chybu, ktorá sa dá eliminovať pomocou korekcie. [17]

Precíznosť merania – Podľa VIM je definovaná ako tesnosť zhody medzi indikáciami alebo nameranými hodnotami veličiny, získanými opakovanými meraniami na rovnakom alebo podobnom objekte, za dodržania podmienok opakovateľnosti a reprodukovateľnosti merania. Je kvantifikovaná charakteristikami variability ako sú rozptyl a rozpätie. [17], [19]

Pre rozpätie sa v praxi používa vzťah (3.1):

$$R = y_{max} - y_{min} \quad (3.1)$$

Kde:

y_{max} je najväčšia nameraná hodnota meranej veličiny,

y_{min} je najmenšia nameraná hodnota meranej veličiny.

Výberový rozptyl je ďalší z ukazovateľov precíznosti merania, v praxi sa môžeme stretnúť aj s jeho druhou odmocninou, čiže výberovou smerodajnou odchýlkou. Vzťah (3.2) pre výberový rozptyl je:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$

Kde:

n je celkový počet meraní danej veličiny, y_i je i -tá hodnota meranej veličiny, \bar{y} je aritmetický priemer všetkých meraní a i je číslo merania. [19]

Presnosť merania – je podľa VIM definovaná ako tesnosť zhody medzi nameranou hodnotou a pravou hodnotou nameranej veličiny. Tiež je považovaná za kvalitatívnu charakteristiku a nedá sa preto vyjadriť kvantitatívne. Pri vyhodnotení merania sú rozhodujúce

kvantitatívne charakteristiky, vyjadrujúce presnosť výsledku, napríklad neistota merania. Preto sa najčastejšie vyhodnocujú dve základné charakteristiky – odhad priemeru (hodnotí správnosť merania) a odhad variability (hodnotí precíznosť merania). [17], [19]

Hodnoty meranej veličiny – Hodnoty meranej veličiny môžeme rozdeliť do nasledujúcich kategórií:

Pravá hodnota – nazývaná aj skutočná hodnota, je to absolútne presná hodnota, ktorá sa v praxi nedá zistiť ani zmerať žiadnym meracím meradlom.

Nameraná hodnota – hodnota, ktorá sa blíži k pravej hodnote, získaná meraním.

Konvenčná hodnota – hodnota, nahrádza pravú hodnotu veličiny. V praxi sa získava pomocou etalónu alebo iným presnejším meraním. Jej neistota merania sa pre každý prípad určí dohodou, konvenciou.

Referenčná hodnota – je rovnaká ako konvenčná hodnota. Toto označenie sa používa pri kalibrácii etalónov a meradiel. [17]

Úplný výsledok merania – Úplný výsledok sa skladá z nameranej hodnoty a neistoty merania, ktorá nesie informácie o presnosti, s akou sa blíži nameraná hodnota ku pravej hodnote meranej veličiny. Výsledok sa zapisuje do tvaru (3.3), kde Y je nameraná veličina, y odhad meranej veličiny a U je rozšírená neistota meranej veličiny. Všetky hodnoty musia byť uvedené v rovnakých jednotkách. [17]

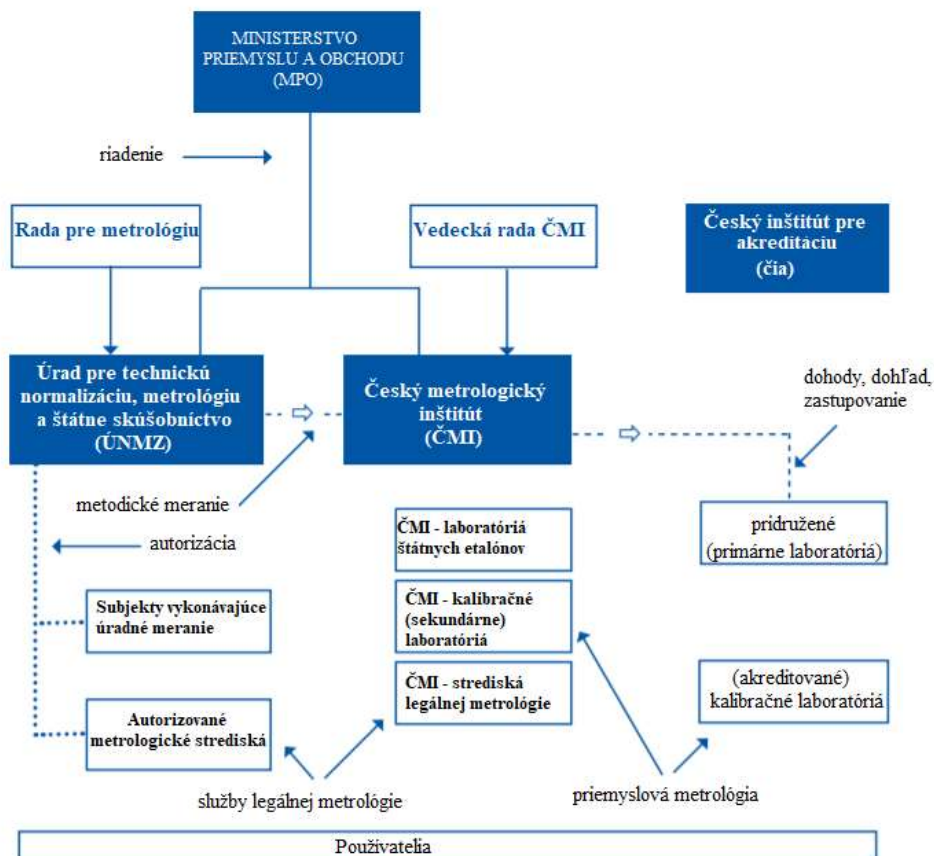
$$Y = (y \pm U) \quad (3.3)$$

Kalibrácia – je to činnosť, ktorá podľa VIM, za špecifických podmienok stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny s neistotami merania poskytnutými etalónmi a následne v druhom kroku použije tieto informácie k stanoveniu vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie. [17]

Metrologická nadväznosť - je to vlastnosť výsledku merania, pomocou ktorej je výsledok vzťahnutý k stanovenej referencii cez dokumentovaný reťazec kalibrácií. Pričom každý prvom reťazca prispieva k stanovenej neistote merania. [17]

3.2 Metrologický systém v ČR

Je to systém, ktorý slúži k zaisteniu jednotnosti a správnosti meradiel a merania v danom štáte. Toto zaistenie nastáva pomocou technických prostriedkov, zariadení a predpisov. Medzi prvky, ktoré tvoria národný metrologický systém zahrňujeme: spotrebiteľov, podnikateľské subjekty a tiež prvky, ktoré sa podieľajú na manažmente a zabezpečovaní služieb pre tieto subjekty. Štát má v systéme osobitné zastúpenie, jeho funkcia je tvorenie a schvaľovanie metrologickej legislatívy, či kontrolovanie dodržiavania pravidiel vyplývajúcich z tejto legislatívy, tiež činnosti spojené so zabezpečením rozvoja metrológie v Českej republike. Metrologický systém je porovnateľný s ostatnými členskými štátmi Metrickej konvencie a tiež štátmi EÚ. Štruktúra národného metrologického systému je zobrazená na obrázku č.20 [20]



Obr. 11) Národný metrologický systém v ČR. [20]

Ministerstvo priemyslu a obchodu

Je to hlavný orgán štátnej správy. Zabezpečuje úlohy vyplývajúce zo zákona č. 20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrológie a štátneho skúšobníctva. Okrem toho riadi štátnu politiku a navrhuje legislatívne úpravy v oblasti metrológie, vypracováva návrhy rozvoja metrologického systému, je riadiacim orgánom úradu pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo a Český metrologický inštitút. [20]

Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo (ÚNMZ)

Úrad zabezpečuje úlohy vyplývajúce zo zákonov Českej republiky a tiež z predpisov a noriem Európskej únie. V oblasti metrológie stanovuje a zabezpečuje realizovateľnosť programu štátnej metrológie, zastupuje ČR v medzinárodných metrologických orgánoch, kontroluje činnosť ČMI, vydáva osvedčenia o spôsobilosti metrologických zamestnancov, zaisťuje jednotný postup pri uchovávaní štátnych etalónov a mnoho ďalších úloh. [20]

Český metrologický inštitút

Národný inštitút zaisťuje metrologický výskum, uchováva štátne etalóny. Vykonáva štátne metrologické kontroly meradiel, metrologický dozor, metrologickú kontrolu baleného

tovaru. Tiež sa zaoberá certifikáciou referenčných materiálov a poskytuje odborné služby v oblasti metrológie. [20]

Český inštitút pre akreditáciu (ČIA)

Pôsobí v ČR ako akreditačný orgán. Poskytuje služby v oblasti akreditácie a dozoru nad trvalým plneným požiadaviek na subjekty posudzovania zhody. Je členom vrcholových medzinárodných akreditačných organizácií. [20]

3.3 Právne predpisy v oblasti metrológie

Medzi najvýznamnejší legislatívny akt v Českej republike v oblasti metrológie patrí zákon č. 505/1990 Sb., o metrológii v znení ďalších novelizujúcich predpisov. Od tohto zákona sa odvíja ďalšia metrologická legislatívna. Účelom zákona je úprava práv a povinností fyzických osôb (podnikateľov) a právnických osôb, spolu s orgánmi štátnej správy v rozsahu, ktorý je potrebný k zaisteniu jednotnosti a správnosti meradiel. [21], [22]

Ďalšie významné zákony v oblasti metrológii patria:

- Zákon č. 20/1993 Sb. O zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie metrológie a štátneho skúšobníctva
- Zákon č.90/2016 Sb. O posudzovaní zhody stanovených výrobkov pri ich dodávaní na trh
- Zákon č. 22/1997 Sb. O technických požiadavkách na výrobky, v znení neskorších predpisov.

Na zákon o metrológii ďalej nadväzujú vyhlášky Ministerstva priemyslu a obchodu a nariadenia vlády ČR. [23]

3.4 Rozdelenie meradiel podľa zákona o metrológii

Etalóny – Slúžia k realizácii a uchovávaniu jednotky alebo stupnice a k jej prenosu na nižšiu presnosť. Pod uchovávaním etalónov rozumieme, všetky potrebné úlohy k zachovaniu ich metrologických charakteristík.

Stanovené meradlá - Tieto meradlá musia byť stanovené vyhláškou MPO k povinnému overovaniu vzhľadom na ich význam (ochrana zdravia, životného prostredia atď.)

Pracovné meradlá – Sú to meradlá, ktoré sa neradia ani medzi etalóny ani stanovené pracovné meradlá.

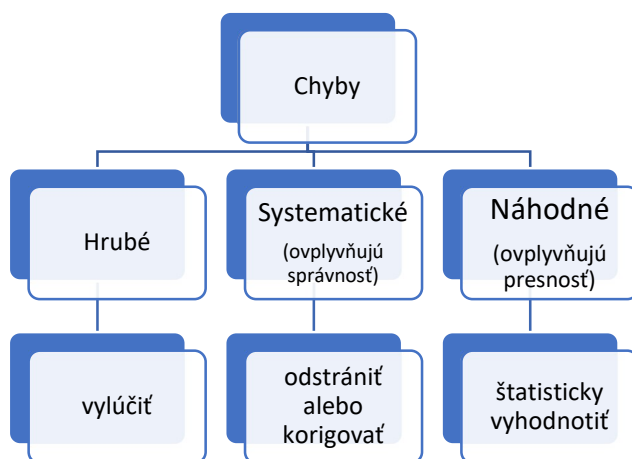
Certifikované referenčné materiály a ostatné materiály – Tieto materiály a látky, musia mať presné stanovené zloženie a vlastnosti. Používajú sa predovšetkým pri overovaní a kalibrácii prístrojov a tiež pri vyhodnocovaní meracích metód či určovaní vlastností materiálu. [22]

4 NEISTOTA MERANIA

Výsledok merania neurčuje len výsledná nameraná hodnota, poprípade priemer z týchto hodnôt. Ovpľyňuje ho mnoho faktorov a preto je potrebné výsledok vždy uviesť aj s príslušnou neistotou merania. Chyby merania, ktoré ovpľyňujú veľkosť neistoty sú zhrnuté v tejto kapitole.

4.1 Chyba merania

Aj keď cieľom každého merania je poznať skutočnú hodnotu meranej veličiny v praxi sa nestretneme so žiadnym meraním alebo meracou metódou, ktorá by bola absolútne presná. Rôzne vplyvy môžu negatívne ovpľyvniť meraných výsledkov a teda spôsobiť odchýlku medzi nameranou a skutočnou hodnotou sledovanej veličiny. Zdrojom chýb pri meraniach sú obvykle nedokonalosti meracích prístrojov, nevhodnosť zvolenej metódy, zmeny podmienok ale tiež aj ľudské chyby. [24]



Obr. 12) Delenie chýb merania [25]

4.1.1 Delenie chýb

- Hrubé

Vznikajú prevažne z nedbalosti, napríklad chybným odčítaním alebo zapísaním údajov z prístroja. Pri opakovanom meraní môžeme spozorovať ich výskyt a to tak, že sa v súbore nameraných hodnôt jedna výrazne líši od ostatných. Aby sme teda predišli skresleným výsledkom takto spozorovanú odlišnú hodnotu vylúčime zo spracovania. [19], [24]

- Systematické chyby

Na rozdiel od náhodných chýb, tieto chyby ovpľyňujú správnosť každého merania. Pri opakovanom meraní sú tieto chyby pravidelné a systematicky zväčšujú alebo zmenšujú výsledok. Preto sme schopný určiť z čoho vznikajú, odhadnúť ich veľkosť a eliminovať výslednú chybu merania. Sú spôsobované výberom nevhodnej meracej metódy, nepresným meradlom alebo meracím prístrojom. [24] [25]

- Náhodné chyby

Tieto chyby sa nedajú predvídať a sú opísané určitým rozdelením pravdepodobnosti. Je ťažké ich eliminovať, pretože ich vznik je podmienený veľkým počtom náhodných vplyvov. Aj pri použití ideálneho meradla a ideálnej meracej metódy sa výsledky nebudú úplne zhodovať. Pri vyhodnocovaní výsledku je nutné stanoviť najpravdepodobnejšiu hodnotu nameranej veličiny a stanoviť jej presnosť – kvantitatívne vyhodnotiť ako náhodné chyby ovplyvňujú výsledok merania. [24]

4.2 Neistota merania

Je to nezáporný parameter, charakterizujúci rozptýlenie hodnôt priradených k meranej veličine. Tento parameter sa neudáva len pri výsledku merania, ale tiež u meradiel, hodnôt použitých konštánt, pri overovaní prístrojov, kalibráciách. Stanovenie neistoty merania je ovplyvnené, podľa toho čo vyhodnocujeme. Môže ísť o priame meranie jednej veličiny alebo nepriame meranie jednej, poprípade viacerých veličín. Neistota sa skladá z mnohých zložiek. Základom pri určovaní neistôt je štatistický prístup. Predpokladáme určité (normálne) rozdelenie pravdepodobnosti. Toto rozdelenie udáva, ako sa môže meraná hodnota odchyľovať od skutočnej. Postup výpočtu neistôt meraní sa delí podľa toho či ide o priame alebo nepriame meranie. Priama metóda merania je taká, kedy výsledkom merania je hodnota danej meranej veličiny. Do tejto metódy môžeme zaradiť aj automatizujúce meracie zariadenia. Tieto merania sú charakteristické tým, že nepotrebujú, okrem výnimiek, kedy ide o korekciu merania, žiadne ďalšie výpočty. Pri nepriamej metóde merania sa výsledný hodnota danej veličiny určuje na základe výsledkov priamych meraní pomocných veličín, ktoré sú s veličinou viazané známym vzťahom. [24]

4.2.1 Štandardná neistota typu A

Získava sa z opakovaných meraní. Čím je týchto meraní viac, tým hodnota neistoty typu A klesá. V prípade malého počtu meraní ($n < 10$) je spoľahlivosť výpočtu pomocou tejto metódy malá. Preto je dôležité zopakovať toto meranie najmenej 10 krát. Zložky neistoty tohto typu sú charakterizované odhadom rozptylov a smerodajných odchýlok stanovených z opakovaných meraní. V tomto prípade sa štandardná neistota typu A určí ako výberová smerodajná odchýlka z výberového priemeru. Používame výberovú odchýlku, pretože namerané hodnoty x predstavujú určitý malý výber, z takmer neobmedzeného množstva hodnôt, ktoré môže meraná veličina dosiahnuť. Výberový priemer používame zase pretože, hodnota, uvedená ako výsledok merania sa vypočíta ako priemer hodnôt opakovaných odčítaní. [19], [26], [42]

Výpočet výberového priemeru \bar{x} pri priamom meraní sa určí zo vzťahu (4.1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Kde: n je počet meraní a x_i je i -té meranie.

Štandardná neistota typu a sa určí pomocou vzťahu (4.2):

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

4.2.2 Štandardná neistota typu B

Vyhodnotenie tohto typu štandardnej neistoty je iné ako v prvom prípade. Základom je určovanie jednotlivých zložiek neistôt od rôznych zdrojov.

Tieto zdroje neistôt môžu byť:

- Nedokonalosti meracích prostriedkov
- Nedokonalosť použitých metód meraní
- Nestálosť podmienok prostredia a jeho neustála zmena (vlhkosť, tlak, pôsobenie elektrického alebo magnetického poľa)
- Vplyv ľudskej chyby (osobnostné zvyklosti, tepelné vyžarovanie tela)
- Ostatné možné vplyvy (poloha prístroja, denná doba, ročné obdobie, nedokonalosť vzťahov alebo závislostí pri vyhodnocovaní) [24], [27]

Výpočet neistoty typu B potom prebieha tak, že si vytipujeme možné zdroje, určíme neistotu každého zdroja, prepočítame tieto neistoty na odpovedajúce zložky neistoty meranej veličiny a nasledovné zlúčenie jednotlivých neistôt do výslednej štandardnej neistoty typu B, vzťah na výpočet u_B je v rovnici (4.4):[4]

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (4.4)$$

Kde u_{zj} je príspevok k neistote u_B od všetkých zdrojov.

4.2.3 Kombinovaná štandardná neistota

Podľa zákona o šírení neistoty je kombináciou neistôt typu A a B. Vzťah na výpočet kombinovanej neistoty u_C je v rovnici (4.5) pričom u_A je neistota typu A a u_B je neistota typu B: [4]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4.5)$$

4.2.4 Rozšírená neistota

Je súčinom kombinovanej neistoty u_C a koeficientu rozšírenia (pokrytia) k . V prípade ak vo výsledku použijeme len kombinovanú neistotu, až tretina výsledkov merania sa môže ocitnúť mimo stanovené pásmo neistoty. Preto je nutné rozšíriť túto neistotu tak, aby sme pokryli čo najväčší interval. Vo vzťahu (4.6) pre výpočet rozšírenej neistoty je k koeficient rozšírenia a u_C je kombinovaná štandardná neistota merania: [4], [19]

$$U_x = k \cdot u_C \quad (4.6)$$

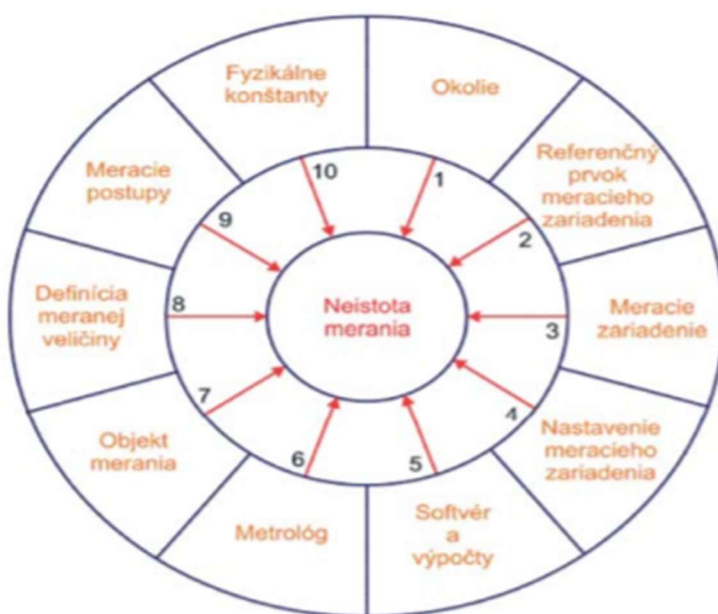
Hodnotu koeficientu k si volíme tak, aby hodnota prekročenia U bola minimálna.

Základné koeficienty k sú:

$k=1$	Pravdepodobnosť pokrytia približne 68,27%
$k=2$	Pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45%
$k=2,58$	Pravdepodobnosť pokrytia približne 99,01%
$k=3$	Pravdepodobnosť pokrytia približne 99,73% [19]

4.2.5 Presnosť merania a vplyv na výsledok merania

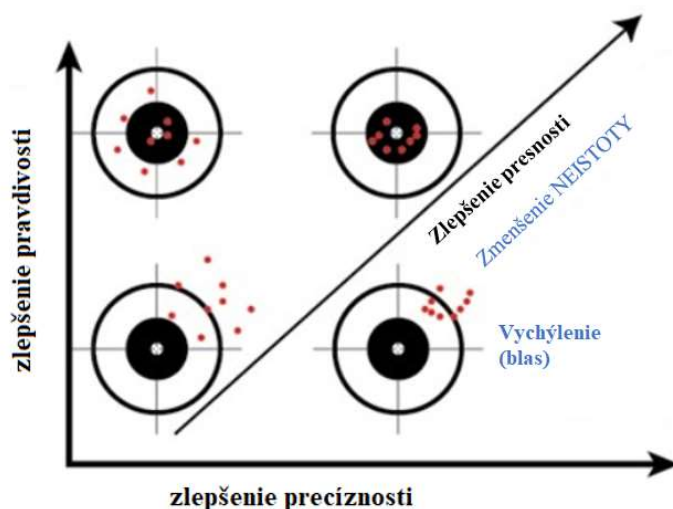
Žiadny pracovný postup, použitá metóda alebo meranie nie je natoľko presné, aby sme určili skutočnú hodnotu merania a špecifikovali meranú veličinu len jednou hodnotou. Preto sa meraná veličina určuje rozptylom veličiny. Zavádzame neistotu merania v rozsahu, aký je potrebný na požadovanú interpretáciu merania, ktorá môže alebo nemusí mať významnú hodnotu vo vzťahu k požadovanej presnosti merania. Existuje mnoho významných aj menej významných vplyvov na neistotu merania, výber najvýznamnejších z nich je zobrazený na obrázku č.13. [27]



Obr. 13) Vplyvy na výsledok merania[27]

Vzťah medzi presnosťou pravdivosťou a neistotou merania je zobrazený na obrázku č. 14. Ideálny stav, vyplývajúci z obrázka, nastáva vtedy keď s rastúcou presnosťou klesá hodnota neistoty merania.

Vzťah presnosti, pravdivosti a neistoty merania



Obr. 14) Vzťah medzi presnosťou, pravdivosťou a neistotou merania [28]

V prípade, že naše meranie bude vysoko precízne, ale nebude správne, interval nameraných hodnôt nebude obsahovať reálnu hodnotu. Naopak, ak by sme merali správne, ale nie precízne, interval síce bude obsahovať reálnu hodnotu, ale bude veľmi široký. [28]

4.3 Stanovenie neistoty merania na CMM

V nasledujúcej podkapitole popíšeme metódy, ktoré sa využívajú k stanoveniu neistoty na CMM. Už predtým, v kapitole č. 2 sme popísali chyby, ktoré môžu nastať na CMM a ktoré ovplyvňujú neistotu merania súradnicových strojov. Najväčšiu pozornosť budeme venovať substitučnej metóde, ktorá slúžila ako podklad pre praktickú časť výpočtu tejto diplomovej práce.

4.3.1 Metóda použitia kalibrovaných objektov alebo etalónov (substitučná metóda)

Táto metóda je založená na štatistickom vyhodnotení chýb merania pozorovaných vo vzťahu ku kalibračnej hodnote meraného (referenčného) objektu. Pre správnosť je nutné použiť dostatočné množstvo meraní (> 20) za rôznych podmienok. Táto metóda experimentálne stanoví účinok chýb, ktorý sa prejaví vo forme odchýlky od nominálneho rozmeru. Výsledkom teda je stanovenie veľkosti chyby nie však ich identifikácia. [29]

Pri aplikácii tejto metódy je potrebné zachovať niekoľko podmienok :

- Umiestnenie a orientácia meraného objektu musí byť na tej istej osi, rovine a v rovnakej výške,
- Merací postup musí byť stály- zachovaný rovnaký postup a počet meraní,
- Nastavenie a použitie sondy musí byť vždy rovnaké.
- Podmienky prostredia – počas merania musí byť zachovaná teplota a vlhkosť prostredia.

Rozdiel, ktorý získame z merania kalibrovaných objektov a ich stanovenými hodnotami sú použité na výpočet neistoty merania. Túto neistotu môžeme potom prehlásiť za chybu CMM. [29]

Vyhodnotenie individuálnych štandardných neistôt substitučnou metódou

Štandardná neistota kalibrovaného objektu u_{cal}

Výpočet neistoty u_{cal} sa uskutoční podľa nasledujúceho vzťahu (4.7). Neistota je vyhodnotená pomerom rozšírenej neistoty merania U_{cal} a koeficientom k . Tento parameter nájdeme v kalibračnom certifikáte daného meraného objektu. [29]

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (4.7)$$

Štandardná neistota postupu merania u_p

Neistota u_p sa vyhodnotí podľa vzťahu (4.8): [29]

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.8)$$

Pričom \bar{y} je dané vzťahom (4.9):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.9)$$

Kde:

n je počet meraní,

y_i je výsledok i- tého merania počas vyhodnotenia neistoty merania. [29]

Štandardná neistota systematickej chyby

Vo väčšine prípadov môžeme spozorovať systematickú chybu b , ktorá nastane medzi indikovanou hodnotou CMM \bar{y} a kalibrovanou hodnotou kalibrovaného objektu x_{cal} . Táto chyba sa potom vypočíta podľa vzťahu (4.10): [29]

$$b = \bar{y} - x_{cal} \quad (4.10)$$

Hodnota tejto chyby je odhadovaná pomocou najmenej 20 meraní. Štandardná neistota, ktorá je spojená z touto chybou sa potom vypočíta podľa vzťahu (4.11): [29]

$$u_b = (T - 20^\circ C) \times u_a \times L \quad (4.11)$$

pričom:

u_a je štandardná neistota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti kalibrovaného objektu,

T je priemerná teplota kalibrovaného objektu,

L je nominálna hodnota kalibrovaného objektu. [29]

Štandardná neistota u_w z výrobného procesu

Stanovenie neistoty u_w patrí medzi najťažšie. Vychádza z kolísaní chýb tvaru a drsnosti v dôsledku výrobných zmien. Môžeme ju zanedbať ak sú na meranie použité kalibrované objekty, poprípade majú nekalibrované objekty zanedbateľné zmeny. Ak sú tieto zmeny vychádzajúce z výrobného procesu nezanedbateľné, príspevok k neistote sa vypočíta zo zmeny súčiniteľa teplotnej rozťažnosti, podľa vzťahu (4.12) : [29]

$$u_{wt} = (T - 20^\circ C) \times u_a \times l \quad (4.12)$$

kde:

u_a je štandardná neistota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti objektu,

T je priemerná teplota, počas vyhodnotenia neistoty merania,

l je dĺžka meraného objektu.

Potom u_w sa vypočíta podľa vzťahu (4.13):

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2} \quad (4.13)$$

u_{wp} je štandardná neistota spojená zo zmenami mechanických vlastností nekalibrovaných objektov. Musíme ju zobrať v úvahu vtedy, keď sa príspevok k neistote z výrobného procesu nedá zanedbať. [29]

4.3.2 Ostatné metódy stanovenia neistoty

Multipozičná metóda

Táto metóda sa často označuje aj ako nesubstitučná metóda. Špecifikácia ja podobná ako pri substitučnej metóde no na rozdiel od nej je jednoduchšie implementovateľná a použiteľná. Meranie nekalibrovaného objektu prebieha vo viacerých bodoch a rovinách. Analýza prebieha na základe vyhodnotenia smerodajnej odchýlky meraných charakteristík, ktoré rozlišujú dve zložky neistoty: Vplyv opakovania merania CMM s rozdelením meracích bodov, odchýlkami tvaru vlnitosti a drsnosti povrchu meraného objektu a vplyv geometrických chýb CMM v súvislosti s vplyvom meracieho dotyku. [29]

Metóda Monte Carlo

Predchádzajúce metódy, predpokladajú známe a relatívne stabilné rozloženie pravdepodobnosti ich jednotlivých zložiek, čím vytvárajú výborné podmienky pre použitie simulačnej metódy, akou je aj metóda Monte Carlo. Je založená na algoritmoch, využívajúcich simuláciu systému. Ako vstupné hodnoty sú použité namerané dáta pomocou jednej z metód. Výsledkom je stanovenie výsledného vplyvu na celkovú neistotu a nie jej jednotlivé zložky, pomocou simulácie. [29]

5 POPIS MERACIEHO STROJA A POUŽITÝCH ETALÓNŮV

V nasledujúcej kapitole popíšeme optický merací prístroj a etalóny, ktoré boli použité pri výpočtoch.

5.1 Optický merací stroj Micro–Vu Sol 311

Stanovenie neistoty prebiehalo na stojanovom optickom meracom stroji firmy Micro – Vu SOL 311, na obrázku č. 15. Stroj sa nachádza v laboratóriách Ústavu výrobných strojov systémov a robotiky, FSI VUT. Nový systém implementuje technológie na zabezpečenie rýchlosti a presnosti na meracom stroji. Používa sa predovšetkým na meranie rozmerov, kontrolu lekárskeho prístrojov, presne opracovaných častí, presných plastov, elektroniky a i. Rada SOL je považovaná za spojivo medzi manuálnymi a automatickými strojmi. Využíva manuálne ovládače X, Y, Z a motorizovaný objektív so zoomom. Rozlíšenie na stroji je 1 μ m. Merací rozsah osí X a Y je 315mm a osi Z je 160mm. Presnosť udávaná výrobcom je daná rovnicou (5.1) pre X a Y a rovnicou (5.2) pre Z. Zadaná dĺžka L je uvedená v milimetroch. [30]

$$4,5 + L / 150 \mu m \quad (5.1)$$

$$2,8 + L / 100 \mu m \quad (5.2)$$

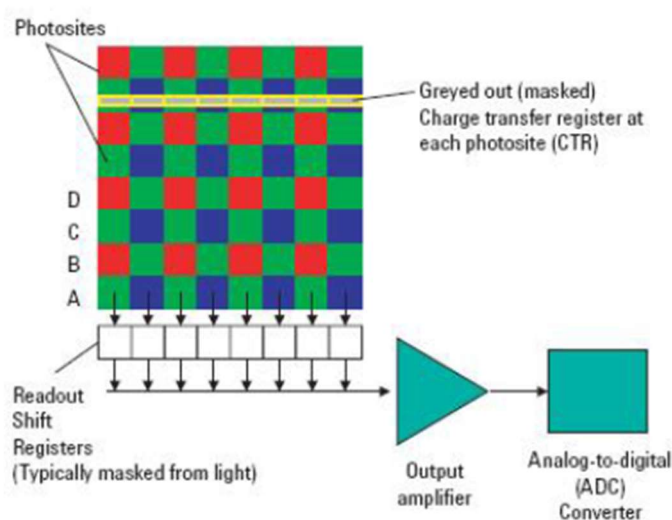
Objektív je ručne ovládaný posunom v ose Z a kombinovaný s technológiou detekcie hrán pomocou softvéru InSpec. Na stroji sa nachádza 19,5 násobné zväčšenie, programovateľným a viac segmentovateľným osvetlením, 6,5 násobné optické zväčšenie a 3 násobné digitálne zväčšenie. Zväčšenie sa dá ďalej upraviť aj v meracom softvéri Inspec, toto zväčšenie môže byť rádovo vyššie, závisí na veľkosti zobrazovanej plochy na monitore.[30]



Obr. 15) Optický merací prístroj Micro-Vu SOL 311 [30]

5.1.1 Optický CCD snímač

Súradnicový stroj Micro-Vu Sol 311 využíva CCD optický snímač, ktorý už bol opísaný v kapitole č. 2. CCD čip sa na trhu využíva už mnoho rokov, prvý snímač bol použitý v roku 1975, vyvinutý bol primárne pre kamerový priemysel. Má mnoho svetlocitlivých buniek, ktoré pri reakcii so svetlom produkujú elektrický náboj. Čím viac svetla dopadne na čip, tým väčší náboj vznikne. Dáta na čipe sú čítané po riadkoch (obr.16) , okrem svetlocitlivých buniek je v čipe posuvný register, kam sa presunie náboj z prvého riadku (riadok A na obrázku č. 16), po prejdení zosilovačom prejde do A/D prevodníka, odkiaľ dostaneme digitálne dáta. Aplikovanie zosilnenia na celý riadok predchádza vzniku príliš veľkého šumu, čo znamená, že obraz je v celom prípade takmer rovnaký. Následne sa všetky riadky presunú o riadok nižšie (B do A, C do B) a znova sa zopakuje zosilnenie dát, až pokiaľ nedôjde k prečítaniu všetkých riadkov. Dôležitým faktorom pri čipoch je ich kvantová efektivita QE, ktorá vypovedá o množstve svetla, ktoré je v skutočnosti prevedené na náboj. Typická QE pre CCD čip je okolo 60%, pri niektorých vlnových dĺžkach to môže byť aj 90%. [11], [13]



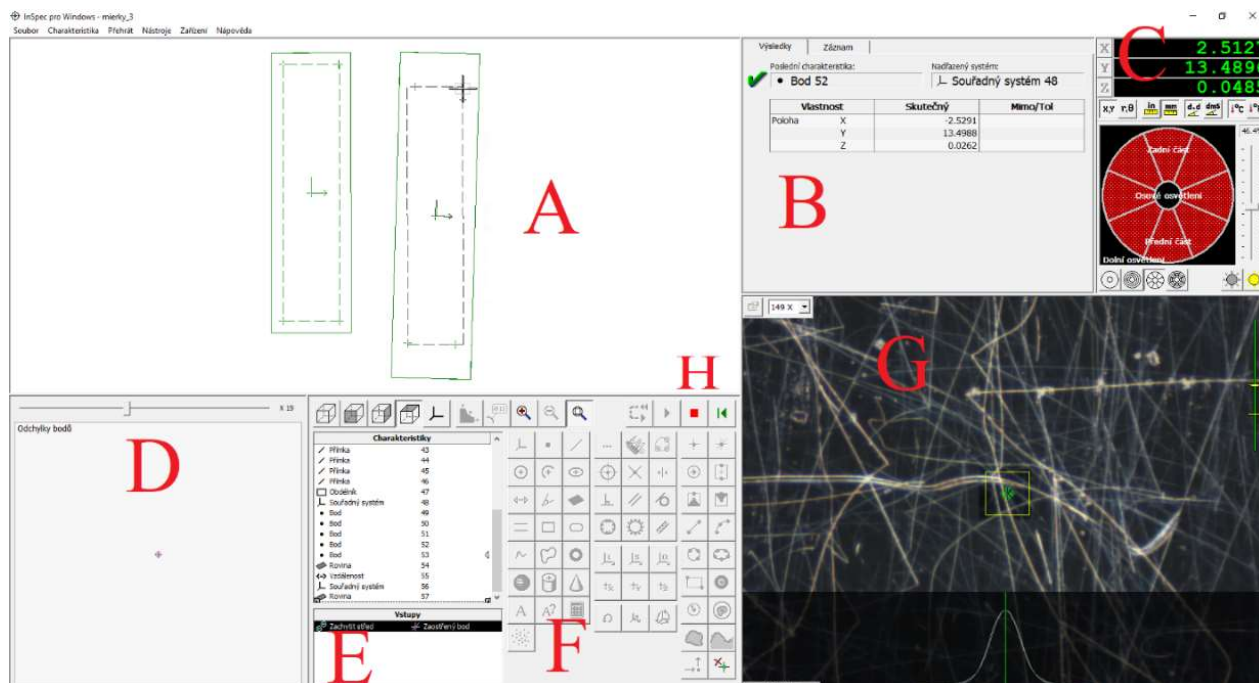
Obr. 16) Princíp čítania dát na CCD snímači [11]

5.1.2 Počítačový softvér Inspect

Merací stroj Micro-Vu Sol 311 je riadený počítačovým softvérom pre presné meranie, vytvoreným firmou Microsoft Foundantion Classes. Počítačový softvér poskytuje jednoduchú patentovanú detekciu hrán, fungujúcu na princípe „ukáž a klikni“, pokročilé riadenie a kalibráciu osvetlenia či prehľadné zobrazenie nameraných údajov a tolerancií. Pomocou programu môžeme zmerať veľké množstvo charakteristík, ako napríklad výška, priemer, polomer, hrana či vzdialenosť. Program bol prispôbený a vyvinutý pre používateľov tak, aby bol ľahko ovládateľný a umožnil zautomatizovanie niektorých procesov (ako napríklad automatické vytvorenie protokolu o meraní). Pripojenie k počítaču je cez USB rozhranie. [30]

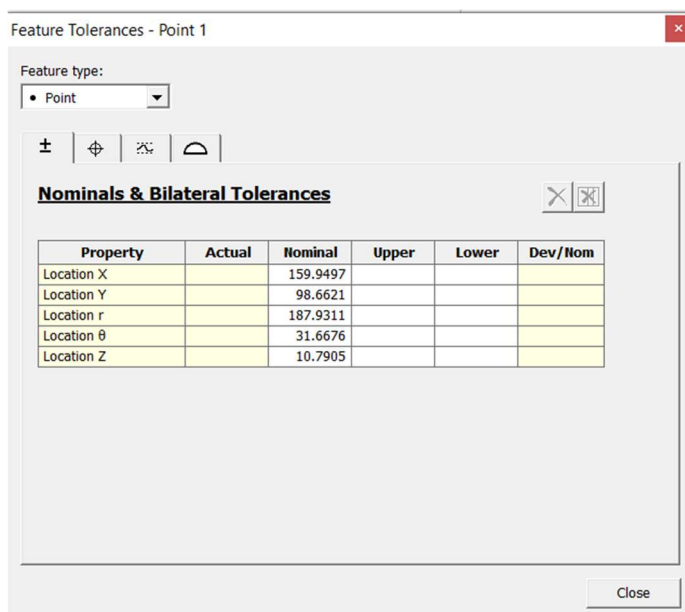
Používateľské rozhranie softvéru

Po kliknutí na ikonu softvéru sa otvorí hlavná obrazovka programu, obrázok č. 17. Túto obrazovku môžeme rozdeliť na viacero častí. V Časti A je schematické okno, kde sa graficky znázorňuje rozsah a charakter merania súčiastky. Grafické zobrazenie súčiastky vzniká súčasne s programom a mení sa počas reálneho merania. V tomto bode je možné sledovať, aktuálnu polohu stroja. Tiež sa tu pri spustení programu znázorňuje poloha ďalšej charakteristiky, táto vlastnosť je výhodná pri začatí merania alebo pri meraní manuálnych bodov. Obraz sa dá natočiť v niekoľkých uhloch. V časti B je tabuľka s nameranými charakteristikami súčiastky. Pred samotným meraním je vhodné si zadať tolerancie ako na obr. 13. Pri meraní nám systém automaticky vypočíta či sa daný rozmer nachádza v určených toleranciách alebo nie. Časť C zobrazuje aktuálnu polohu stroja v osiach X, Y a Z a tiež je tu možnosť nastaviť si osvetlenie a jas pracovného stroja. Počas merania sa v časti D zobrazujú odchýlky bodov jednotlivých meracích prvkov. K vytvoreniu charakteristiky s ideálnou geometriou sa v program InSpec používajú dátové body. Odchýlka každého jedného dátového bodu sa nazýva zvyšková chyba a je zobrazená v tomto okne. Príprava a postup programu je v časti E. Pri príprave programu v nej vidíme jednotlivé prvky, ktoré budeme merať a systém ich bude vyhodnocovať. Pri samotnom meraní môžeme podľa tejto tabuľky sledovať, kde sa nachádzame a aký prvok budeme následne snímať. Pri príprave programu používame najviac časť F, kde sú všetky konštrukčné ikony (prichytenie k stredu, stredový bod, priesečník a i.) a ikony optických nástrojov (manuálny bod, prvá hrana, profil kruhu a i.), ktoré slúžia na vytvorenie programu. Kamerová časť programu je označená G, kde vidíme snímaný prvok a jeho povrch. V tejto časti si dokážeme nastaviť veľkosť zoomu. V spodnej časti sa nám zobrazuje v akom momente je obraz ostrý a teda je pripravený na meranie. Ikony, v časti H používame na spustenie meracieho programu.




Obr. 17) Používateľské rozhranie programu InSpec [autor]

Tolerancie jednotlivých prvkov sa dajú nastaviť v tabuľke na obrázku č.18. Je tu možné nastaviť tolerancie meracieho rozsahu, odchýlku merania, rovinnosti, priamosti či kruhovitosti. Môžeme si tiež určiť hornú a dolnú hranicu tolerancie.



Feature Tolerances - Point 1

Feature type:
• Point

± | 

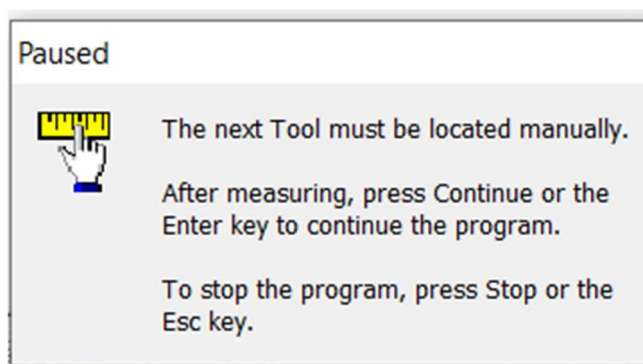
Nominals & Bilateral Tolerances

Property	Actual	Nominal	Upper	Lower	Dev/Nom
Location X		159.9497			
Location Y		98.6621			
Location r		187.9311			
Location θ		31.6676			
Location Z		10.7905			

Close

Obr. 18) Nastavenie tolerancií v program Inspect

Pri spustení meracieho programu je potrebné postupovať podľa inštrukcií zo softvéru. Prvé dva body si musíme označiť ručne a následne sa k daným bodom len mechanicky priblížime a pomocou kamery a tlačidla ENTER popřípadě nožného spínača ich zaznamenáme. Počas nasnímania programu nás program sám inštruuje, čo je potrebné vykonať, podobne ako na obrázku č. 19

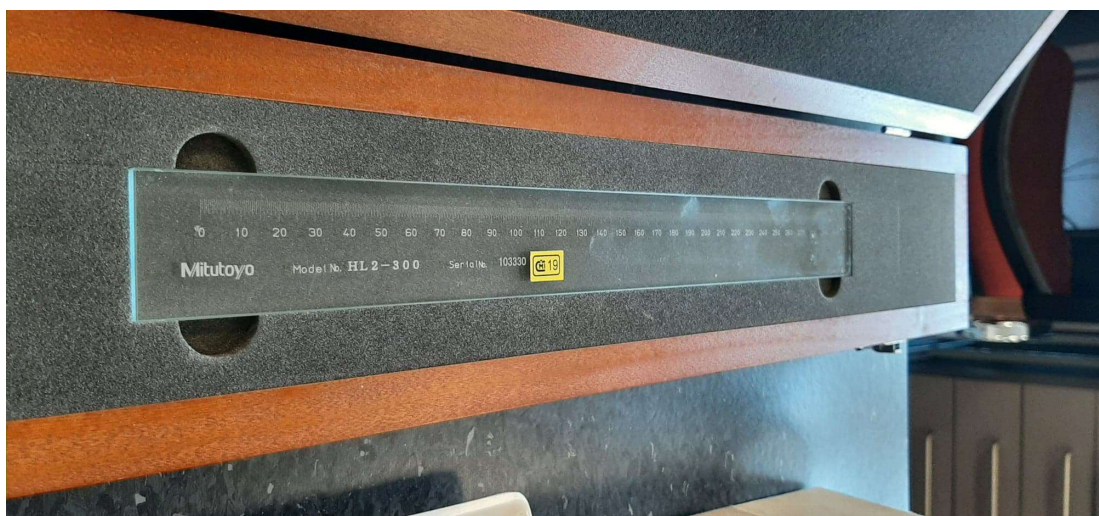


Obr. 19) Postup pri meraní v programe

5.2 Sklenené pravítko

Sklenené pravítko je pevné celosklenené dĺžkové pravítko s vyznačenou stupnicou. Pravítka môžeme rozlišovať podľa viacerých kategórií ako je presnosť, merací rozsah, delenie číselnej stupnice, materiálu skla alebo hrúbky skla. Najčastejšie sa vyrábajú zo sodného skla. Využitie pravítok je rôzne, podľa presnosti ich delíme na pravítka s nižšou presnosťou, tieto sa využívajú predovšetkým na kontrolu presnosti zväčšenie meracích projektorov, mikroskopov a tiež na meranie presnosti posúvania stolov meracích prístrojov. Sklenené pravítka s vyššou presnosťou sa využívajú ako etalóny pri kalibrácii meradiel so stupnicou. [31]

Na meranie bolo použité sklenené pravítko firmy Mitutoyo na obrázku č. 20. Vlastnosti pravítka sú zhrnuté v tabuľke (2).



Obr. 20) Sklenené pravítko [autor]

Tab 1) Charakteristiky skleneného pravítka [31]

Rozsah merania	0 – 300 mm
Stupňovanie	0,5 mm
Hrúbka čiarok stupnice	50 μm
Hmotnosť	0,57 kg
Presnosť	(0,5 + 1L) μm L = meraná dĺžka v mm
Koeficient teplotnej rozťažnosti	(8 \pm 1) $\times 10^{-6}$ /K
Materiál	Sodné sklo

5.3 Koncové mierky

Sú to kovové respektíve keramické hranoly s presným uhlovým alebo dĺžkovým rozmerom (obr. 21). Najpresnejšie základné (koncové) mierky sú vyrobené z keramických materiálov. Sú charakteristické lakovaným povrchom. Vyznačujú sa vysokou priľnavosťou a rozmerovou stálosťou. Koncové mierky majú dve rovnobežné meracie plochy, s malými odchýlkami rovinnosti a rovnobežnosti. Vzdialenosť medzi nimi je garantovaná na niekoľko desiatok nanometrov.

Sú vyrábané v sadách, v štyroch stupňoch presnosti, podľa normy ČSN EN ISO 3650:2000. Najpresnejšia triedna je označovaná K s chybovosťou $\pm 0,00005$ mm. Mierky najvyššieho stupňa sú používané ako laboratórne etalóny, sú vyrábané len na zákazku. Ďalšie stupne mierok sú 0, 1 a 2. Stupeň 0 má chybovosť od $+0,0001$ mm do $-0,00005$ mm, tieto mierku sú etalónové a využívajú sa na kalibráciu. Stupeň 1 s chybovosťou od $+0,0015$ mm do $-0,0005$ mm je využívaný na kontrolu, kalibráciu mierok 2. triedy a tiež nastavovanie komparátorov. Posledný stupeň s najväčšou chybovosťou od $+0,00025$ mm do $-0,00015$ mm je využívaný ako pracovné mierky, slúži k nastavovaniu meradiel a k vlastnému meraniu. Údaje vzťahujúce sa k presnosti výroby sú súčasťou každej sady. [32], [33]

Na meranie boli použité koncové mierky, používané na laboratórnu výuku na ÚVSSR VUT FSI. Kalibračný list mierok je súčasťou príloh diplomovej práce.



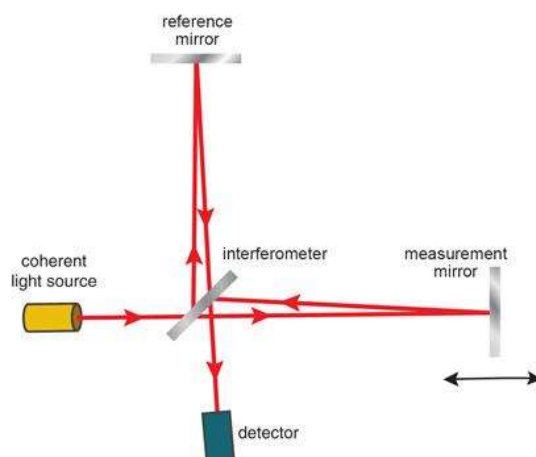
Obr. 21) Koncové mierky, ilustračný obrázok [34]

5.4 Laserový interferometer

5.4.1 Princíp

Základ interferometra sa odvádza od optického interferometra, známeho tiež ako Michelsonov interferometer, pomenovaný po fyzikovi, ktorý tento interferometer zostrojil už v roku 1893.

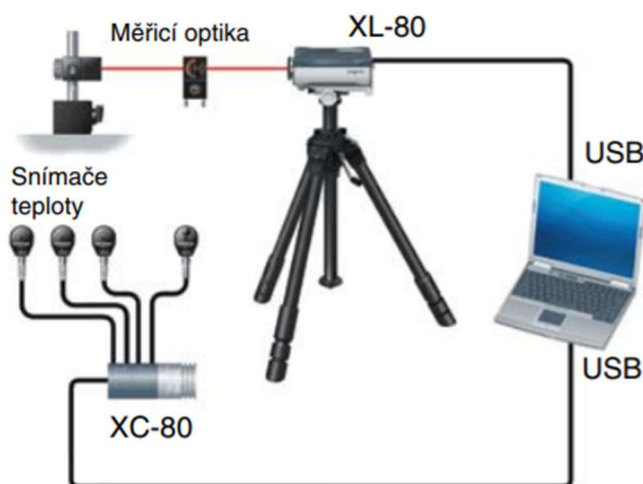
Zdroj svetla emituje svetelný lúč, ktorý sa na polopriepustnom zrkadle rozpadá do dvoch lúčov. Tieto lúče smerujú do dvoch úplne odrazových zrkadiel, z ktorých sa odrážajú na polopriepustné zrkadlo. Na tomto zrkadle dochádza k spojeniu lúčov a vzájomnej interferencii. Pri pohybe zrkadla, zmena vzdialenosti spôsobí striedavé vzájomné zosilňovanie a zoslabovanie svetelnej intenzity spájajúcich sa lúčov. Fotodetektor vytvorí periodický vlnový signál spočítaním počtu vln. Zmena veľkosti signálu odpovedá polovici dĺžky svetelnej vlny. Počet vln je potom úmerný skutočnému premiestneniu pohyblivého zrkadla. [35]



Obr. 22) Princíp interferometrického merania [35]

5.4.2 Laserový interferometer Renishaw XL 80

Základom interferenčného systému Renishaw, ktorý môžeme vidieť na obrázku č. 23 je kompaktná laserová hlavica (XL- 80), ktorá je klasifikovaná ako laser 2. triedy, podľa European laser safety standard EN 60825-1:1994 a samostatný kompenzátor prostredia (XC-80) plus meracie čipy na teplotu materiálu a teploty, tlaku a vlhkosti okolitého vzduchu. Všetky prvky sa pripájajú k počítaču cez USB rozhranie. [36]



Obr. 23) Laserový systém Renishaw XL-80 [36]

5.4.3 Laser XL – 80

Laser XL – 80, na obrázku 24, vytvára mimoriadne stabilný zväzok laserového žiarenia. Vlnová dĺžka zodpovedá národným a medzinárodným normám. Stabilita frekvencie je $\pm 0,05$ ppm za 1 rok na $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Presnosť lineárneho merania je $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ v celom rozsahu podmienok prostredia (tj. pri teplote 0°C až 40°C , tlaku 65kPa – 115kPa). V celom rozsahu rýchlosti merania je zachované čítanie hodnôt s frekvenciou 50kHz. Systém využíva princíp interferometrie nie len pri lineárnom meraní ale pri všetkých druhoch merania. Základom je kompaktná laserová hlavica (XL - 80), kompenzátor podmienok prostredia (XC – 80). Hlavica je vybavená konektorom s výstupom pomocou analógového signálu. Signalizačné LED diódy ukazujú stav stabilizácie lasera a sily signálu. Má tiež zabudovaný USB port a teda je ľahko pripojiteľný k PC. [36]

5.4.4 Kompenzátor XC – 80 a snímače

Kompenzátor, na obrázku č. 24, zaručuje presnosť merania pomocou „inteligentných snímačov“. Veľmi presne meria teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relatívnu vlhkosť. Na základe týchto údajov upravuje vlnovú dĺžku lasera tak, aby do výpočtov bola uvedená jej správna hodnota, čím sa prakticky eliminujú akékoľvek chyby merania vyplývajúce zo zmien podmienok prostredia. Kompenzácia vplyvu prostredia je vykonávaná automaticky v pravidelných 7 sekundových intervaloch. Kompenzátor spolu s laserom XL – 80 vážia niečo málo cez 3 kg. A preto manipulácia s nimi je jednoduchá a ľahká. Ku kompenzátoru je možné pripojiť aj tri snímače teploty materiálu, aby bolo možné normalizovať lineárne meranie na štandardnú teplotu materiálu 20°C . Tieto snímače sú „inteligentné“, majú zabudované integrované mikropočítače, ktoré analyzujú a spracovávajú výstup snímačov pre odoslaním hodnôt do kompenzátoru. Analyzovaním týchto nameraných dát sa meranie stáva oveľa bezpečnejším. Medzi jednotlivými odčítaniami hodnôt je každý snímač pravidelne odpojený, aby sa zminimalizovalo jeho tepelné vyžarovanie. [36]



Obr. 24) Laser XL- 80 a kompenzátor XC–80 od firmy Renishaw [36]

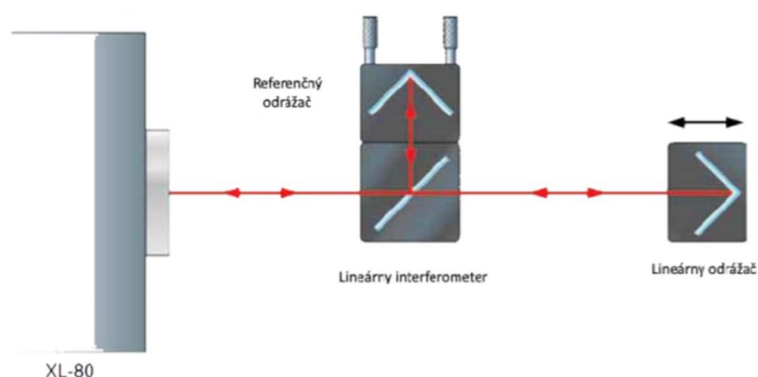
Parametre a špecifikácia laserového systému Renishaw je uvedená v tabuľke č. 3:

Tab 2) Špecifikácia Laser XL80 [36]

Parametre systému	Renishaw XL 80
Rozsah lineárneho merania	0 – 80 m
Presnosť lineárneho merania	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Presnosť merania s kompenzátorom	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Presnosť frekvencie laseru	$\pm 0,05 \mu\text{m}$
Rozlíšenie	1 nm
Maximálna rýchlosť snímaného pohybu	4 m/s
Frekvencia snímaných dát	10 Hz – 50kHz
Doba stabilizácie	< 6 minút
Pracovná teplota	(0 - 40)°C
Parametre snímačov	Renishaw XC 80
Teplota materiálu	(0 – 55) °C, Presnosť $\pm 0,1$ °C
Teplota vzduchu	(0 – 40)°C, Presnosť: $\pm 0,2$ °C
Tlak vzduchu	65 kPa – 115 kPa, Presnosť $\pm 0,1$ kPa
Relatívna vlhkosť	(0 – 95) %, Presnosť $\pm 6\%$

5.4.5 Lineárne meranie

Pri meraní v osi rovnobežnej s lúčom je možné použiť priame ustanovenie interferometra, ako na obrázku č. 25. Je to možné len v prípade ak sa na stroji nenachádzajú žiadne prekážky, ako sú napríklad ochranné kryty alebo iná časť konštrukcie, ktorá by prekážala konštantnému laserovému lúčovi vo všetkých meraných polohách. Pri takomto type ustanovenia sa delič pripevní priamo na referenčné zrkadlo. Lineárny odrážač sa premiestňuje po osi a systém zachytáva zmenu vo vzdialenosti medzi dvomi zrkadlami. Meracieho zrkadlo je umiestnené pomocou magnetu priamo na držiaku nástroja. [37]



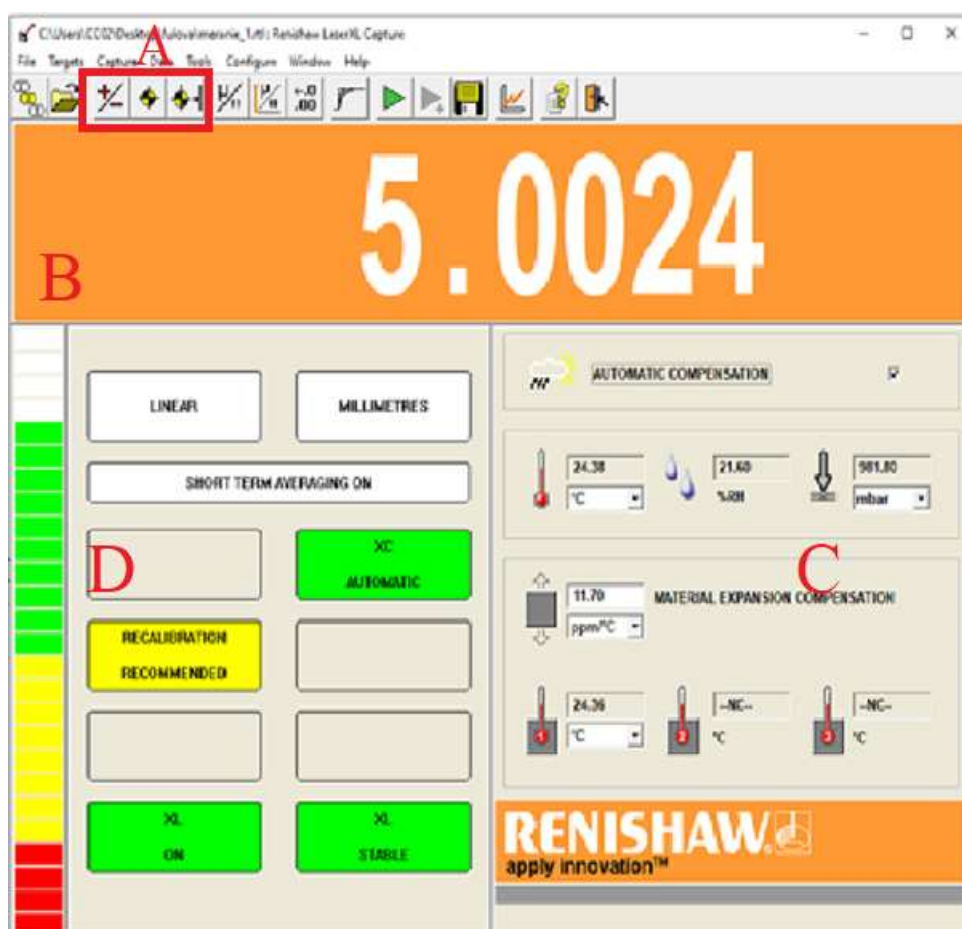
Obr. 25) Lineárne meranie laserinterferometrom [37]

Programové vybavenie

Licencovaným softvérom pri meraní laserovým interferometrom od firmy Renishaw je Laser XL™. Obsahuje modul pre lineárne a uhlové meranie, meranie rovinnosti, priamosti aj kolmosti a tiež je tu možnosť dynamického merania. Získané dáta je možné analyzovať podľa mnohých medzinárodných noriem pre kontrolu prednosti strojov (ako napr.: ISO, ASME, VIDI, JIS,..)

Prostredie výpočtového programu si môžeme vizuálne rozdeliť na viacero častí (obr. 26).

V časti A sa nachádzajú nástroje na nastavenie počiatočného bodu, vynulovanie merania a zmeny polarity. Zobrazenie aktuálnej meranej hodnoty je v časti B. Časť C nás informuje o charakteristikách prostredia, ako je teplota, vlhkosť a tlak a tiež o teplote meracieho prístroja a meracieho predmetu. Tiež sa tu nachádza informácia o hodnote materiálovej konštanty. Tieto informácie pochádzajú z kompenzátora a meracích čipov. V časti D vidíme informácie o sile signálu, type merania a tiež o vhodnosti kalibrácie, v prípade ak sa narušil signál lasera. Po meraní systém automaticky vyhodnocuje rôzne analýzy.



Obr. 26) Používateľské rozhranie Laser™

5.4.6 Faktory ovplyvňujúce presnosť v dôsledku zlého nastavenia interferometra pri lineárnom meraní

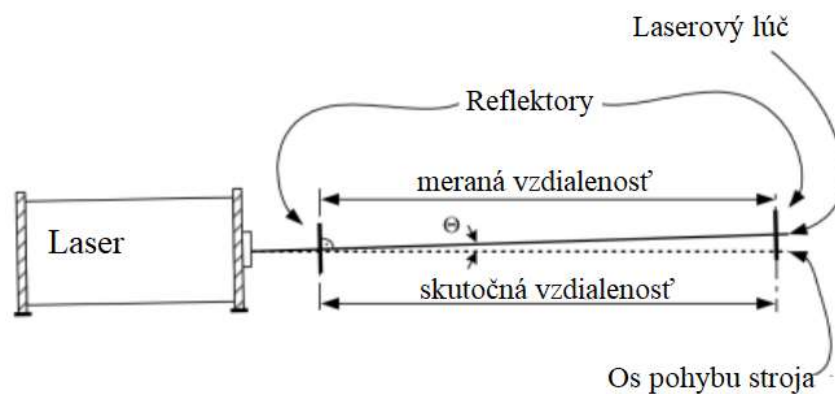
Ak podmienky nedovoľujú ideálne nastavenie vzájomnej polohy lasera voči odrážaču upevneného na stroji – napríklad stiesnené priestory, alebo pri nedodržaní správnych zásad nastavenia interferometra môžu vzniknúť tieto druhy chýb: [38]

- Kosínusová chyba
- Abbeho chyba
- Chyba vznikajúca mŕtvou dráhou

Kosínusová chyba

Táto chyba vzniká v prípade ak lúč nie je rovnobežný s meranou osou stroja. Dôjde k rozdielu medzi skutočnou vzdialenosťou a nameranou vzdialenosťou. Veľkosť tejto chyby závisí od uhla, ktorý je medzi laserovým lúčom a osou stroja, čo popisuje aj obrázok č.27. Čím je uhol vyosenia Θ väčší, tým je nameraná vzdialenosť L_{MER} väčšia ako skutočná veľkosť L_{SKUT} . To dokazuje aj vzťah (5.3) [38]

$$L_{MER} = L_{SKUT} \cdot \cos \Theta \quad (5.3)$$



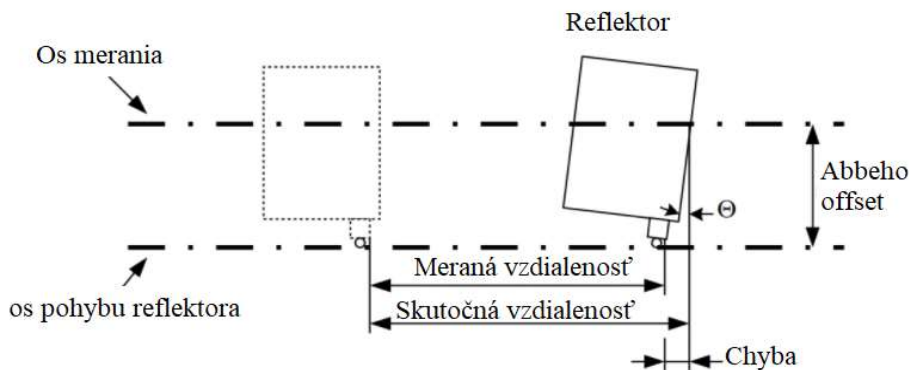
Obr. 27) Kosínusová chyba[38]

Abbeho chyba

Abbeho chyba nastane vtedy, keď je meraný bod oddelený bočne od osi pohybu stroja, čiže neleží v rovnakej osi a v pozičnom systéme sa objavujú uhlové pohyby, ktoré spôsobuje sklon odrazového skla. Sklon reflektora je tým väčší, čím je väčšia vzdialenosť medzi osou merania a osou pohybu. Táto vzdialenosť sa nazýva Abbeho odsadenie alebo Abbeho offset. Tejto chybe môžeme predísť iba tak, ak v osi merania nedochádza k žiadnym uhlovým pohybom retroreflektora a teda je lúč čo najviac zhodný s líniou, na ktorej a meranie uskutočňuje. Princíp Abbeho chyby je znázornený na obr. 28. Veľkosť chyby môže byť určená vzťahom (5.4) [38]

$$\delta = h \cdot \tan \theta \quad (5.4)$$

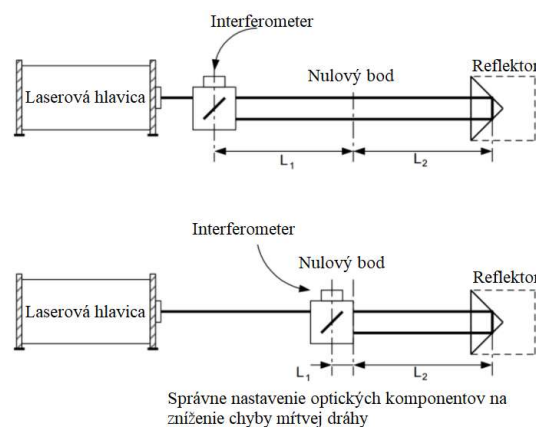
Kde δ je veľkosť chyby, h je rozdiel medzi osou merania a osou pohybu reflektora (Abbeho offset).



Obr. 28) Abbeho chyba [38]

Chyba vznikajúca mŕtvou dráhou

Táto chyba nastane vtedy, keď určitá časť svetelnej dráhy, nazývaná mŕtva dráha nie je zahrnutá v kompenzácii teploty, tlaku a vlhkosti. „Mŕtva dráha“ je vzdialenosť medzi optickým interferometrom a základňou nazývaný tiež nulový bod. Chyba mŕtvej dráhy je závislá na vzdialenosti medzi optickými prvkami systému pri jeho nulovaní. Pri zmene podmienok sa vlnová dĺžka bude meniť po celej dráhe lúča medzi interferometrom a odrazáčom, ale merací systém lasera bude kompenzovať iba meranú časť L_2 a nie dráhu lúča, ktorý prechádza medzi interferometrom a nulovou polohou L_1 , znázornené na obrázku 24. Chyba je tým závažnejšia, čím väčšia je táto vzdialenosť. Pri nulovaní systému je vhodné, aby statická časť systému interferometra a pohyblivý odrazáč. [38]



Obr. 29) Chyba mŕtvej dráhy [38]

6 PRIEBEH MERANIA

V nasledujúcej kapitole je postupne popísaný postup priebehu jednotlivých meraní na optickom meracom prístroji.

6.1 Meranie so skleneným pravítkom

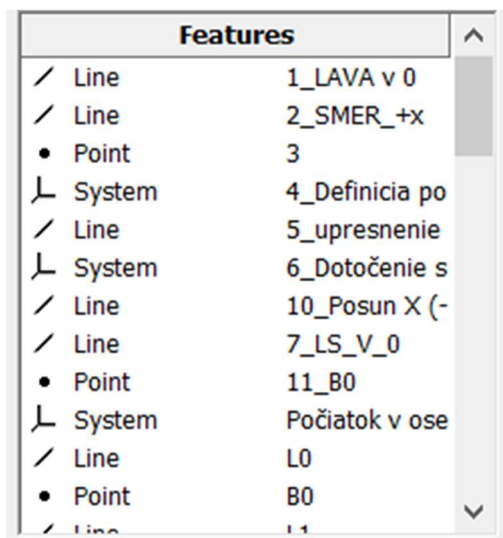
6.1.1 Postup merania

Meranie pravítka prebiehalo v ose X a Y a v uhlopriečkach. Pred samotným meraním bolo pravítko vyčistené alkoholovým prípravkom. Vyčistená bola aj sklenená meracia doska optického prístroja, aby sa predišlo prípadným nepresným meraniam. Na meraciu plochu bolo umiestnené pravítko do stredu plochy a ukotvené pomocou plastelíny, ako môžeme vidieť na obrázku č. 30. V meracom softvéri InSpec sme načítali program špeciálne vytvorený na meranie skleneného pravítka. Po upravení osvetlenia sme spustili merací program. Nastavili sme optický systém na prvú meraciu hranu a spustili sme meranie.



Obr. 30) Meranie skleneného pravítka [autor]

Pred samotným meraním si systém potrebuje určiť začiatok, smer a prípadné natočenie pravítka od osy X (alebo Y). Na obrázku č. 31 môžeme vidieť začiatok meracieho programu. Prvý bod je vytvorenie súradnicového systému na základe dvoch priamok (LAVA v 0; SMER_+x). Následne z toho vznikne počiatočný bod a definovaný súradnicový systém (bod 3. a 4. na obrázku 26). Pre upresnenie smeru, si odmeriame hranu, v dostatočnej vzdialenosti od začiatku, približne za polovicou pravítka. Pomocou tejto hrany si program určí natočenie v osi.



Obr. 31) Začiatok programu na meranie pravítka [autor]

Následné prebiehalo meranie jednotlivých vzdialeností po 30 mm krokoch. Systém vyhodnocoval dve vzdialenosti. Prvá bola vzdialenosť dvoch bodov, nulového bodu B0 a nasledujúcich krokov B1,B2,..., B10. Tieto body boli posunuté oproti počiatku o -0,5 mm. Druhou vyhodnocovacou metódou bolo meranie vzdialenosti dvoch priamok, ktoré boli na seba navzájom kolmé. Zmerali sme hranu rysky z oboch strán a následne z toho si systém určil stredovú priamku rysky. Po skončení merania sa namerané dáta automaticky vyhodnotia na základe určených tolerancií, z programu si je možné dáta stiahnuť priamo vo vytvorenom protokole alebo v excelovom súbore. Ukážka automaticky vytvoreného protokolu je v prílohe diplomovej práce.

6.2 Meranie koncovými mierkami

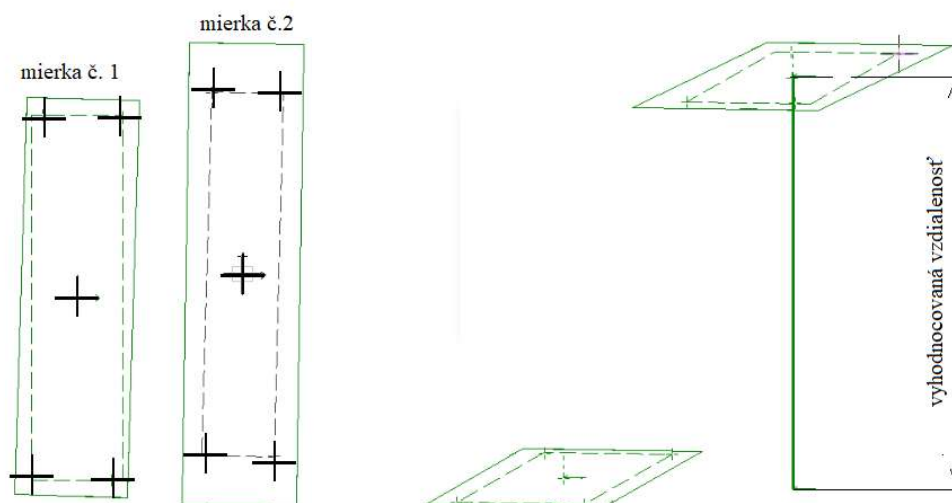
6.2.1 Postup merania

Na meranie sme používali mierky v rozmedzí od 10 po 100 mm. Referenčná hodnota použitej mierky bola 1 mm. Každá mierka bola vopred vyčistená, aby sa predišlo prípadnému zaostreniu zoomu na nečistotu a teda skresleniu merania. Mierky boli položené na interferenčnom sklíčku od výrobcu SOMET, ktoré malo výšku 15 mm a priemer 60 mm. Usporiadanie mierok na sklíčku môžeme vidieť na obrázku č. 32.



Obr. 32) Meranie koncových mierok [autor]

V meracom softvéri sme si vytvorili program na výpočet kolmej vzdialenosti dvoch rovín. Najprv sme zmerali rovinu prvej, menšej mierky a to tak, že sme priamkami vyznačili polohu mierky a potom postupne označili krajné body mierky. Vzhľadom na skosenie mierky na hranách sme museli body označiť vo vzdialenosti 2,5 mm od hrany a zmerali sme aj stredový bod mierky. To isté meranie sme potom urobili na väčšej mierke. Grafické znázornenie z programu Inspec, je na obrázku č. 33, kde čierne krížiky na mierkach označujú merané body.



Obr. 33) Grafické znázornenie meracích bodov na mierkach [autor]

6.3 Meranie laserovým interferometrom

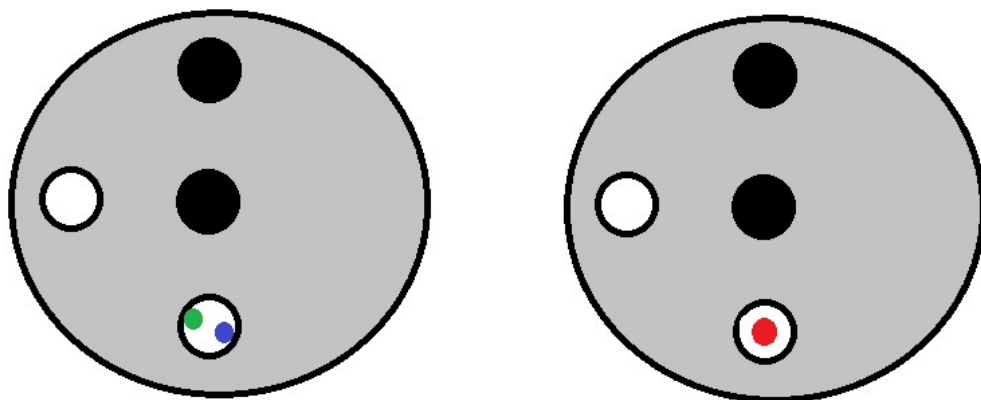
6.3.1 Nastavenie laserového lúča

Pred samotným začatím merania sme museli lúč lasera presne nastaviť. Nesprávne nastavenie lúča môže spôsobiť neschopnosť lasera rozpoznať polohu pohybujúceho sa zrkadla v dôsledku slabého signálu. Ako môžeme vidieť na obrázku č. 34, laserová hlava bola postavená na samostatnom stojane v ose merania, čím sme sa snažili eliminovať Abbeho chybu. Na plochu stroja sme umiestnili odrazové sklíčka. V prvej sade meraní sme lineárny interferometer umiestnili na meraciu plochu a zaistili plastelínou, v druhej sade meraní sme, ako je možné vidieť na obrázku č. 36, po vytvorení prípravku na držanie interferometra odinštalovali zoom v ose Z a pripevnili tam interferometer.



Obr. 34) Príprava lasera na meranie [autor]

Vyrovňovanie laserového lúča sme spravili pomocou skrutiek na stojane, ktoré môžeme vidieť na obrázku č. 34. Spodnou pákou na stojane sa upravila poloha lasera v ose Z. Bočnou skrutkou sa dá nastaviť poloha laserovej hlavy na stojane a zadnými skrutkami natočenie lasera. Nastavenie lúča spočíva v prekrytí dvoch bodiek lúčov, znázornených na obrázku č. 35. Prvé nastavenie prebieha na počiatku merania, čiže v bode nula, kde sa hrubými pohybmi či už lasera alebo stroja, napolohuje tak, aby lúč dopadal na stred terčika pri zachovaní lineárnosti medzi odrážačom a laserom. Snažíme sa o prekrytie lúča z interferometra (zelený lúč na obrázku č.35) a odrážača na terčíku (modrý lúč na obrázku č. 35). Ak dôjde k prekrytiu môžeme si pomocou LED diód skontrolovať silu signálu. Je potrebné z terčika pretočiť polohu na terč clony lasera. Ak nám svietia všetky diódy, signál je najsilnejší. Po prvom nastavení je potrebné prejsť do koncovej polohy a prípadným jemným natočením upresniť polohu lúčov tak, aby sa opäť prekrývali. Ak sa nám to podarí, je potrebné vrátiť sa do začiatkovej polohy a znova skontrolovať či je nastavenie správne. Postupným prejdením si celej meranej dĺžky, môžeme kontrolovať či je sila signálu dostatočná na celej dĺžke.

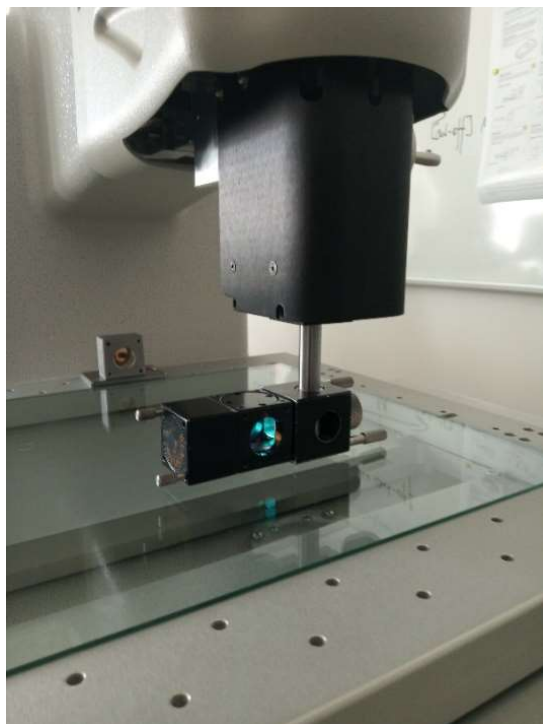


Obr. 35) Vyrovnávanie laserového lúča, modrý lúč – lúč z odražača, zelený lúč z interferometra. Červený lúč znázorňuje prekrytie oboch lúčov [autor]

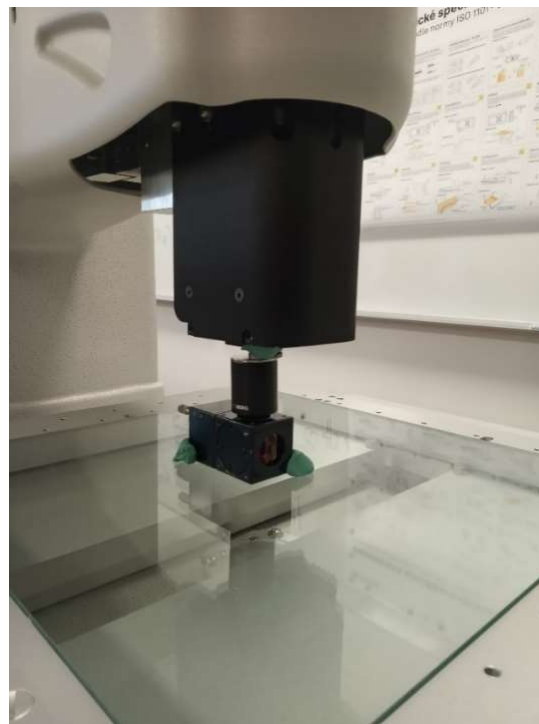
6.3.2 Prípravok na uchytenie

Na uchytenie interferometra sme použili vytvorený prípravok – na obrázku č. 38 a 39.

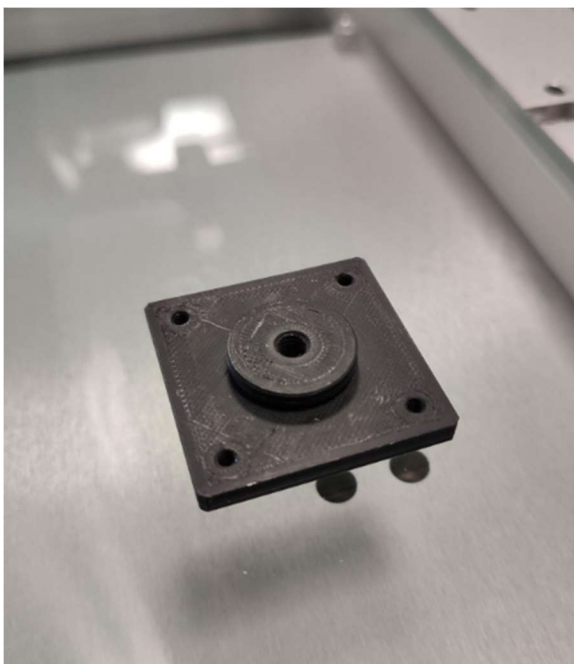
(Príloha D). Aby mohol byť prípravok umiestnený bolo potrebné odinštalovať osvetlenie a zoom v ose Z (obr. č 36 a 37).



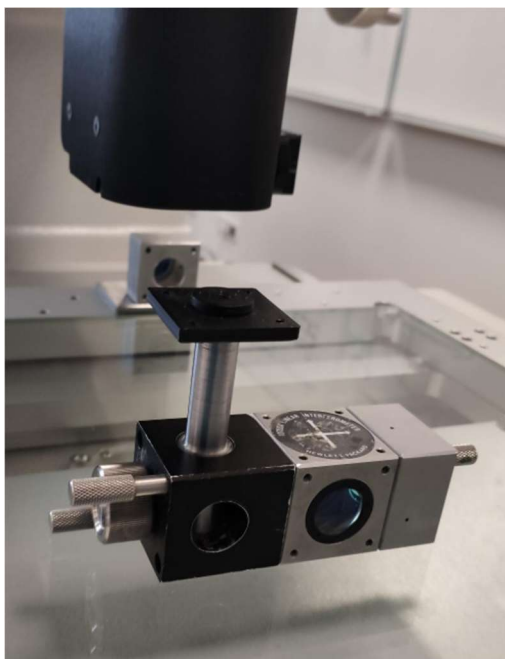
Obr. 36) Prípravok na uchytenie (os X a Y) [autor]



Obr. 37) Prípravok na uchytenie os Z [autor]



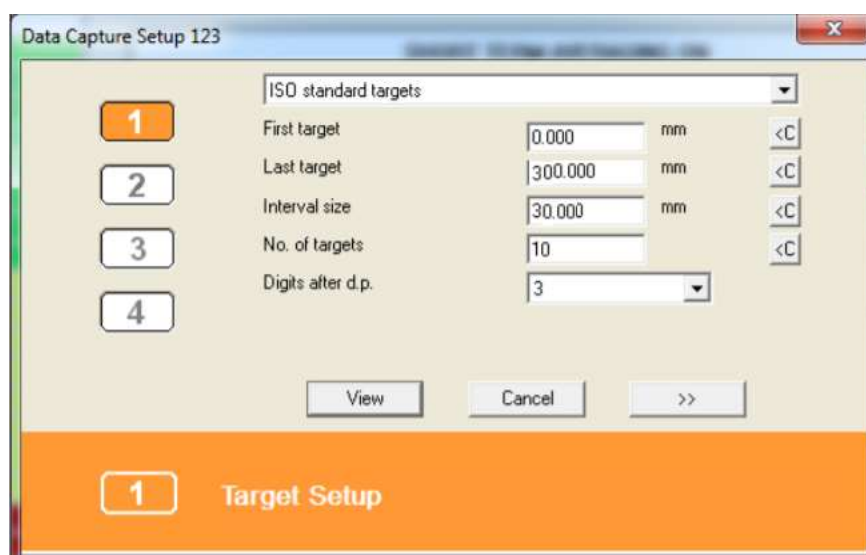
Obr. 38) Prípravok na uchytenie[43]



Obr. 39) Prípravok na uchytenie
zabudovaný do interferometra[43]

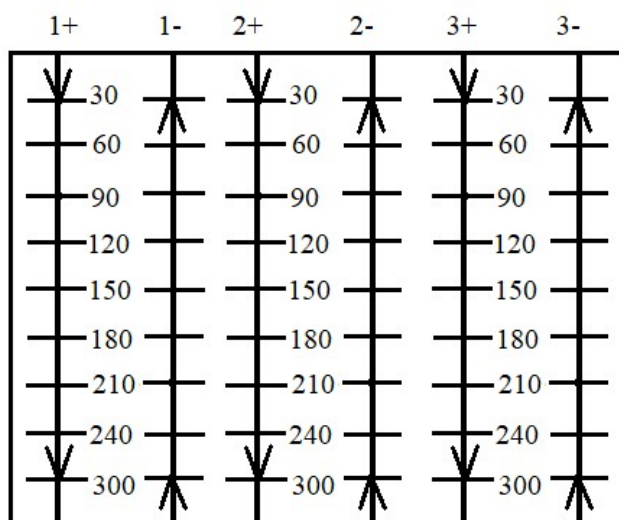
6.3.3 Priebeh merania

Po nastavení lúča sme spustili merací program. V počiatočnej polohe sme vynulovali a nastavili polaritu merania v programe LaserTM. Následne sme spustili merací program, kde sme si museli nastaviť počet krokov a počet opakovaní. Počet krokov sme nastavili pomocou prvej tabuľky (obr. č. 40), kde sme si stanovili merací rozsah, prvý meraný bod a posledný merací bod, poprípade počet krokov a interval merania.



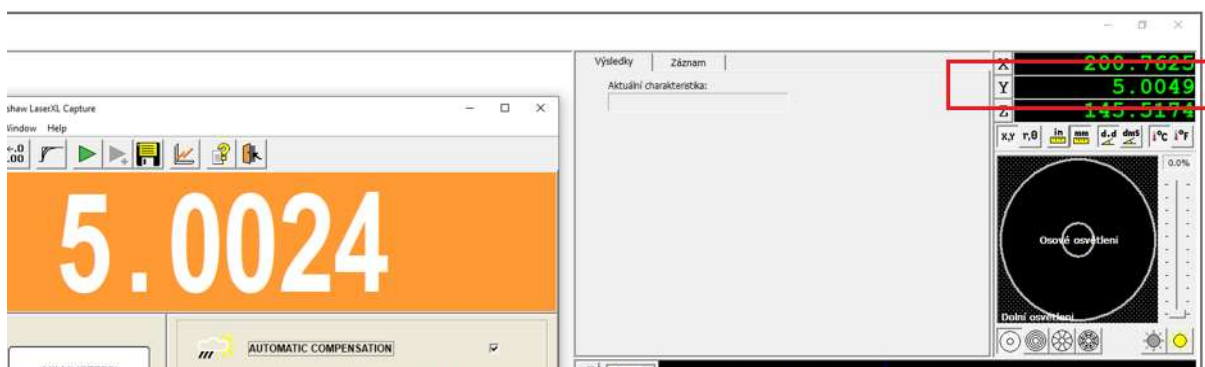
Obr. 40) Nastavenie meracích bodov v Laser Data Capture

Meranie potom prebiehalo po intervalových krokoch. Jedna sada meraní pozostávala z prejdienia meracieho rozsahu 3 krát v riadnom (+) smere a 3 krát v opačnom (-) smere, podľa obr. č. 31, po jednej priamke.



Obr. 41) Grafické znázornění průběhu měření

Zaznamenávání dat proběhlo zápisem údajů z měřicího softwaru Inspec (obr. č. 42) do softwaru LaserTM a následným vyhodnocením odchylky.



Obr. 42) Prepis dat z programu Inspec do LaserTM

7 STANOVENIE NEISTOTY MERANIA OPTICKÉHO STROJA MICRO-VU SOL 311

Na stanovenie neistoty merania bola vybraná substitučná metóda. Vzhľadom na to, boli ako etalóny vybrané sklenené pravítko a koncové mierky. Ich rozmerové charakteristiky sú dostatočne presné, preto sa dajú považovať za vhodné kalibračné prvky. Pred samotným vyhodnotením neistoty merania je nutné identifikovať možné zdroje neistoty na stroji a vzhľadom k tomu upraviť substitučnú metódu, ktorá je podrobne opísaná v norme ČSN EN ISO 15530:2012

Zdroje štandardnej neistoty

- Štandardná neistota typu A - u_A - analýza nameraných dát
- Štandardná neistota použitého etalónu - u_E
- Štandardná neistota rozlišovacej schopnosti meracieho prístroja - u_p
- Štandardná neistota dĺžky vplyvom teplotnej rozťažnosti - u_{LT}
 - Vplyv rozdielu teplôt etalónu a prístroja - $u_{\Delta T}$
 - Vplyv rozdielu teplôt od 20°C - $u_{\Delta 20}$
 - Vplyv rozdielu koeficientov teplotnej rozťažnosti - $u_{\Delta \alpha}$

7.1 Výpočet neistoty typu A – u_A

Štandardná neistota typu A sa získa štatistickými prostriedkami z nameraných dát. Po nameraní dátovej sady, sa urobí v programe Minitab test odľahlých hodnôt, čím sa predíde novej náhodnej chybe. Po odstránení odľahlých hodnôt sa v programe MS Excel vypočíta aritmetický priemer \bar{x} podľa rovnice (7.1) a následne potom výberová smerodajná odchýlka s_x podľa rovnice (7.2):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7.2)$$

Kde:

x_i sú jednotlivé zmerané hodnoty,

n je počet nameraných hodnôt.

Výsledný neistota u_A je potom rovná smerodajnej odchýlke aritmetického priemeru $s_{\bar{x}}$, ktorá sa vypočíta podľa vzťahu (7.3):

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.3)$$

7.2 Výpočet štandardnej neistoty použitého etalónu - u_E

Štandardná neistota etalónu sa určí pomocou kalibračného listu etalónu. V kalibračnom liste je uvedená rozšírená neistota merania U_E vrátane použitého koeficientu rozšírenia k . Neistotu u_E potom vypočítame podľa vzorca (7.4):

$$u_E = \frac{U_E}{k} \quad (7.4)$$

7.3 Výpočet vplyvu rozlišovacej schopnosti stroja - u_p

Neistota u_p je spôsobená konečnou rozlišovacou schopnosťou meracieho stroja. V prípade, že merací stroj má stupnicu, táto neistota sa určuje podľa schopnosti obsluhy a najmenšieho dielika stupnice v rozmedzí od 0,1 až 1 diel. Pri digitálnych strojoch je jej veľkosť rovná najmenšiemu digitu. Pri príspevku k neistote vplyvom rozlíšenia predpokladáme rovnomerné rozdelenie. V praxi je rovnomerné rozdelenie najčastejšie používané, pretože vo väčšine prípadov nemáme presné a podrobné poznatky o rozdelení pravdepodobnosti výskytu odchýlok. V tomto prípade uvažujeme o rovnakej pravdepodobnosti výskytu ktorejkoľvek odchýlky v celom intervale. Predpokladáme typický koeficient rozdelenia pre rovnomerné (obdĺžnikové rozdelenie) a to $\chi = \sqrt{3}$. [40]

Vzťah pre výpočet príspevku neistoty vplyvu rozlišovacej schopnosti stroja vychádza z všeobecného vzťahu pre výpočet príspevku neistoty merania typu B (7.5) :

$$u_p = c_j \frac{R}{\chi} \quad (7.5)$$

Kde:

- R je rozlišovacia schopnosť prístroja,
- χ je koeficient plynúci z rovnomerného rozdelenia,
- c_j je koeficient citlivosti.

7.4 Výpočet štandardnej neistoty dĺžky vplyvom teplotnej rozťažnosti - u_{LT}

Vplyv teploty pri meraní pomocou CMM sa prejavuje v dĺžkovej zmene. Zmení sa meraný objekt ale aj samotný merací stroj. Zmeny dĺžky, ktoré nastanú pri zmene teploty sa započítavajú do výslednej neistoty merania.

Celkový príspevok k neistote merania sa vypočíta podľa vzťahu (7.6)

$$u_{LT} = \sqrt{((L \cdot \alpha \cdot u_{\Delta T})^2 + (L \cdot u_{\Delta 20} \cdot u_{\Delta \alpha})^2)} \quad (7.6)$$

Kde $u_{\Delta T}$ je neistota rozdielu teplôt meracieho stroja a predmetu, α je stredná hodnota koeficientu rozťažnosti, $u_{\Delta 20}$ je neistota rozdielu teploty od 20°C a $u_{\Delta \alpha}$ je neistota rozdielu koeficientov teplotnej rozťažnosti, L je meraná dĺžka v [m].

Výpočet vplyvu rozdielu teplôt meracieho stroja a meraného predmetu - $u_{\Delta T}$

Pri ideálnom priebehu merania by mala byť zaistená rovnaká teplota meracieho prístroja aj predmetu. V reálnych podmienkach takýto stav nemôžeme docieľiť. Meracie predmety sa preto nechávajú určitý čas v miestnosti, kde je merací stroj, aby bola ich teplota približne rovnaká. Príspevok k neistote vyplývajúci z tohto rozdielu teplôt nie je zanedbateľný[40].

Aj v tomto prípade predpokladáme rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti čiže $\chi=3$. Vzťah pre výpočet vychádza z obecného vzťahu (7.7) a má tvar:

$$u_{\Delta T} = \frac{(t_1 - t_2)}{\chi} \quad (7.7)$$

Kde

$(t_1 - t_2)$ je rozdiel teplôt stroja a predmetu,

χ koeficient plynúci z rozdelenia pravdepodobnosti ($\chi=3$)

Vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20°C - $u_{\Delta 20}$

Predpokladom pre správne meranie je aj monitorovanie teploty v laboratóriu. Je nutné dbať na stálu teplotu čo s najmenším rozptylom. Teplota v laboratóriu je regulovaná klimatizáciou, avšak stále dochádza k odchýlke od hodnoty +20 °C. Pre túto neistotu sa predpokladá rovnomerné rozloženie s koeficientom $\chi = \sqrt{3}$, výpočet tejto neistoty je daný vzťahom (7.8):

$$u_{\Delta 20} = \frac{\Delta t_{20}}{\chi} \quad (7.8)$$

Vplyv rozdielu koeficientov teplotnej rozťažnosti - $u_{\Delta \alpha}$

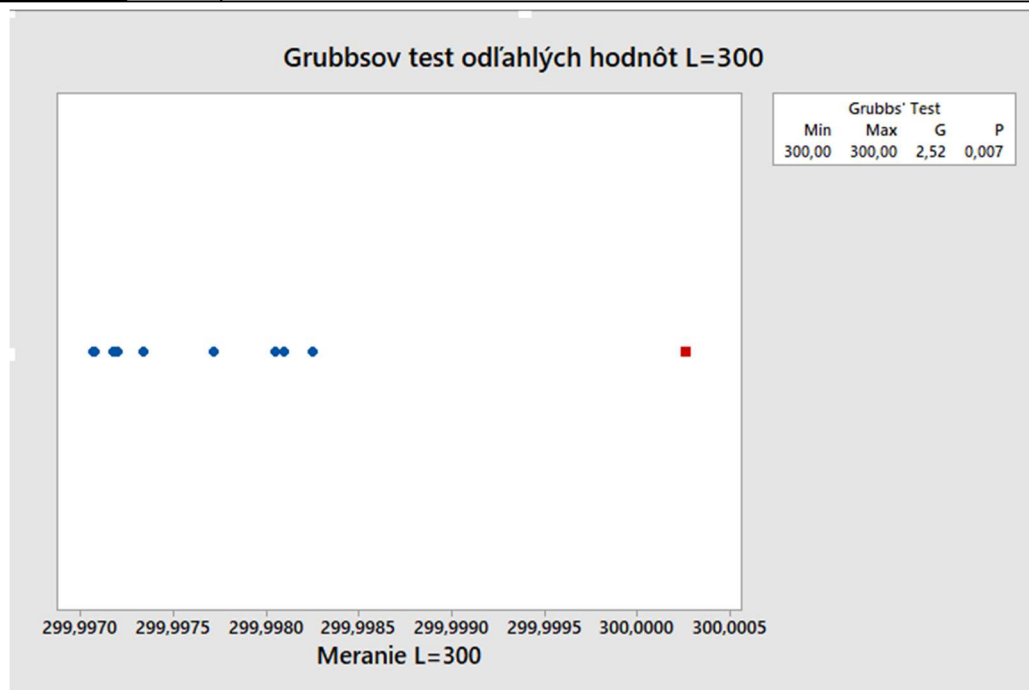
V prípade, že meraný predmet aj stroj sú vyrobené z rovnakého materiálu môžeme túto zložku neistoty zanedbať. V našom prípade to však nie je možné a preto s ňou musíme počítať. Rozloženie pravdepodobnosti je rovnomerné, preto použitý koeficient χ bude mať hodnotu $\sqrt{3}$. Zložka neistoty sa vypočíta podľa vzťahu (7.9):

$$u_{\Delta \alpha} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\chi} \quad (7.9)$$

Kde $(\alpha_1 - \alpha_2)$ je rozdiel koeficientov rozťažnosti stroja a etalónu.

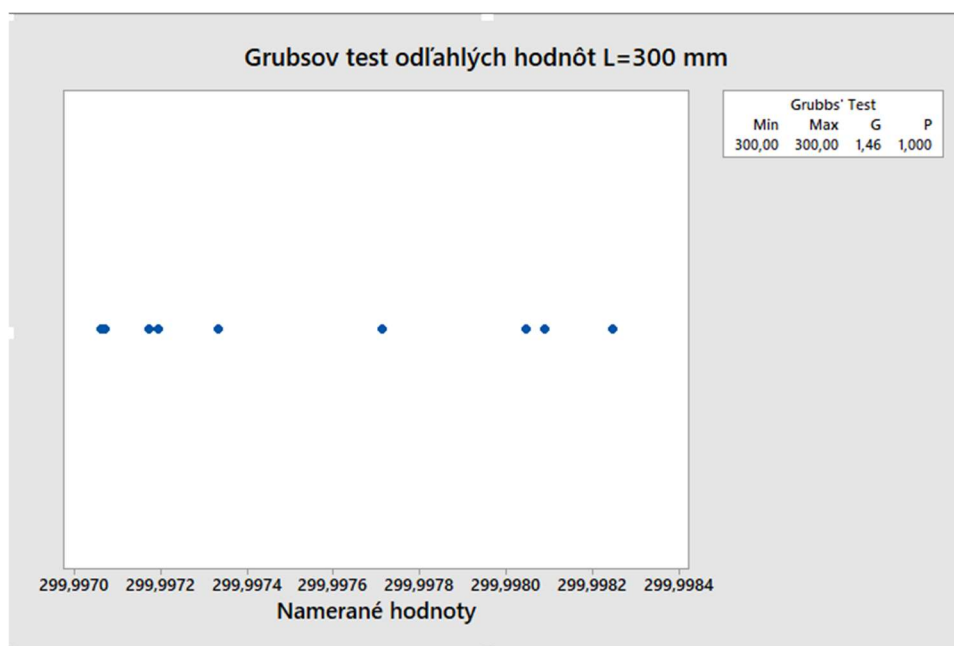
7.5 Modelový príklad výpočtu neistôt

Pre lepšie znázornenie bola zvolená praktická ukážka. Výpočet neistôt bol urobený podľa metodiky v tejto kapitole. Zvolená dĺžka pre výpočet bola 30 mm. Pred samotným vyhodnotením bol urobený Grubsov test odľahlých hodnôt v programe Minitab. Grubsov test je popísaný v norme ČSN ISO 5725-2. Test prebieha na hladine významnosti $\alpha=0,05$. Pri kontrolovaní dát, systém identifikoval jednu odľahlú hodnotu, pri meraní pravítok vo vzdialenosti $L=300$ mm (obr. č. 43).



Obr. 43) Grubbsov test odľahlých hodnôt vo vzdialenosti L= 300 mm, osa X

Po identifikácii, bola hodnota odstránená a test bol zopakovaný. Výsledok testu, po odstránení hodnoty zobrazuje obrázok č. 44:



Obr. 44) Grubbsov test odľahlých hodnôt L=300 mm po odstránení odľahlej hodnoty, os X

Podľa výsledku testu môžeme vidieť, že ďalšia odľahlá hodnota sa v dátovej sade nenachádza. Z obrázku teda vyplýva, že po odstránení odľahlej hodnoty už nemôžeme na hladine významnosti zamietnuť nulovú hypotézu o neexistencii odľahlých hodnôt v pozorovanom súbore. Tento súbor teda môžeme prehlásiť s danou spoľahlivosťou, za zbavený odľahlých hodnôt.

7.5.1 Sklenené pravítko

Na príkladnú ukážku sme využili namerané dáta na sklenenom pravítku vo vzdialenosti 30 mm na ose X.

Výpočet neistoty u_A

Každé meranie na sklenenom pravítku prebiehalo 10 krát. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke č. 3.

Tab 3) Namerané hodnoty pre L=30mm

n	Namerané hodnoty x_i [mm]
1	29,99970955
2	29,99981124
3	29,99896612
4	30,00081513
5	29,99912294
6	29,99996509
7	29,99935478
8	29,99976282
9	30,00038832
10	29,99973513

Výpočet aritmetického priemeru, smerodajnej odchýlky aj samotnej neistoty u_A bol urobený vo výpočtovom programe MS EXCEL. Aritmetický priemer je vypočítaný dosadením do vzťahu (7.1), následne je vypočítaná smerodajná odchýlka (7.2) a neistota typu A (7.3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 29,9998 \text{ mm} \quad (7.10)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0,0006 \text{ mm} \quad (7.11)$$

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,1749 \text{ } \mu\text{m} = 0,0002 \text{ mm} \quad (7.12)$$

Výpočet neistoty u_e

Neistota spôsobená použitým etalónom sa vypočíta pomocou rozšírenej neistoty uvedenej v kalibračnom liste.

Měřidlo	: Skleněné měřítko HL2-300	
Výrobce	: Mitutoyo	
Výrobní číslo	: 103330	
Rozsah	: 300 mm	
Místo měření	: ČMI Ol Brno, odd.6014	
Etalon	:	
Název	Identif. č.	Číslo KL
helio-neonový laser Renishaw XL80	56H160	8014-KL-L0026-16
Podmínky prostředí : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,3) °C		
Výsledky kalibrace uvedené v tomto kalibračním listě byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě.		
Metoda měření	: Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu č. 614-MP-C006.	
Nejistota měření	: $U = (0,5 + 1,0L) \mu m$ L je měřená délka v metrech	

Obr. 45) Výstrižok z kalibračného listu skleneného pravítka [Príloha A]

Rozšířená neistota v kalibračnom liste je uvedená vzťahom (7.13):

$$U = (0,5 + 1L)\mu m, \quad (7.13)$$

Kde L je meraná dĺžka v metroch. Ako koeficient rozlíšenia bolo použité $k=2$. Zložka neistoty u_e sa následne pre sklenené pravítko, vo vzdialenosti $L=30$ mm (0,03m) vyhodnotí dosadením do vzťahu (7.4):

$$u_e = \frac{U_E}{k} = \frac{0,5+1 \cdot 0,03}{2} = 0,265 \mu m = 0,00027 mm \quad (7.14)$$

Výpočet neistoty u_p

Zložka neistoty spôsobená rozlišovacou schopnosťou stroja je v celom rozsahu stroja rovnaká. Rovnaký je aj postup výpočtu hodnoty. Rozlišovacia schopnosť stroja Micro-VU SOL 311 je 0,1 μm . Rozlíšenie bolo určené na takúto hodnotu z Predpokladáme rovnomerné rozdelenie, koeficient rovnomerného rozdelenia je $\chi = \sqrt{3}$. Neistoty u_p sa vypočíta dosadením hodnôt do vzťahu uvedeného (7.5):

$$u_p = \frac{R}{\chi} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \mu m = 0,00006 mm \quad (7.15)$$

Stanovenie zložky neistoty u_{AT}

Rozdiel teploty stroja a pravítka je približne 0,2 °C. Koeficient citlivosti je 0,2925 $\mu m/^\circ C$. Stredná hodnota koeficientu α je 9,75 $\mu m/m^\circ C$ Pre túto zložku sa predpokladám tiež rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti a teda $\chi = \sqrt{3}$. Dosadením hodnôt do vzťahu (7.6) získame výslednú zložku neistoty:

$$u_T = \frac{(t_1 - t_2)}{\chi} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,1155 ^\circ C \quad (7.16)$$

Výpočet príspevku k neistote:

$$u_{\Delta T} = u_T \cdot \alpha \cdot L = 0,1155 \cdot 9,75 \cdot 0,03 = 0,0338 \mu m = 0,000034 mm$$

Stanovenie zložky neistoty $u_{\Delta 20}$

Počas merania na stroji bola v učebni teplota 24,1 °C. V tom prípade je rozdiel teploty od 20°C o 4,1 °C. Koeficient citlivosti je 0,03m. Rozdiel koeficientov teplotnej rozťažnosti je vypočítaný dosadením do vzťahu (7.9). Teplotný koeficient pre stroj je 11,5 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, pre sklenené pravítko je to 8 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Pre tento rozdiel predpokladáme rovnomerné rozdelenie s koeficientom $\chi = \sqrt{3}$. Veľkosť príspevku neistoty je získaná dosadením do vzťahu (7.7):

$$u_{\Delta\alpha} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\chi} = \frac{11,5 - 8}{\sqrt{3}} = \frac{3,5}{\sqrt{3}} = 2,021 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.17)$$

$$u_{\Delta 20} = \frac{\Delta t_{20}}{\chi} = \frac{4,1}{\sqrt{3}} = 2,37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.18)$$

$$u_{T\Delta 20} = u_{\Delta\alpha} \cdot u_{\Delta 20} \cdot L = 2,021 \cdot 2,37 \cdot 0,03 = 0,1435 \text{ } \mu\text{m} = 0,00015 \text{ mm} \quad (7.19)$$

Všetky zložky neistoty sú zhrnuté v bilančnej tabuľke (č. 4)

Tab 4) Bilančná tabuľka pre L = 30 mm

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [mm]
u_A	0,0002 mm	normálne	1	0,0002
u_e	0,0003 mm	normálne	1	0,0003
u_p	0,00029 mm	rovnomerné	1	0,00006
$u_{\Delta T}$	0,115 °C	rovnomerné	$L \cdot \alpha$ $= L \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,000034
$u_{T\Delta 20}$	4,78 °C	rovnomerné	L	0,00015

Neistota typu B sa vypočíta dosadením do vzťahu (7.20):

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = \sqrt{0,0003^2 + 0,0003^2 + 0,000034^2 + 0,00015^2} = 0,000297 \text{ mm} \quad (7.20)$$

7.5.2 Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota sa vypočíta dosadením do vzťahu (4.5). Zložkami neistoty u_C sú zložky u_A a u_B .

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,0002^2 + 0,000297^2} = 0,000345 \text{ mm} \quad (7.21)$$

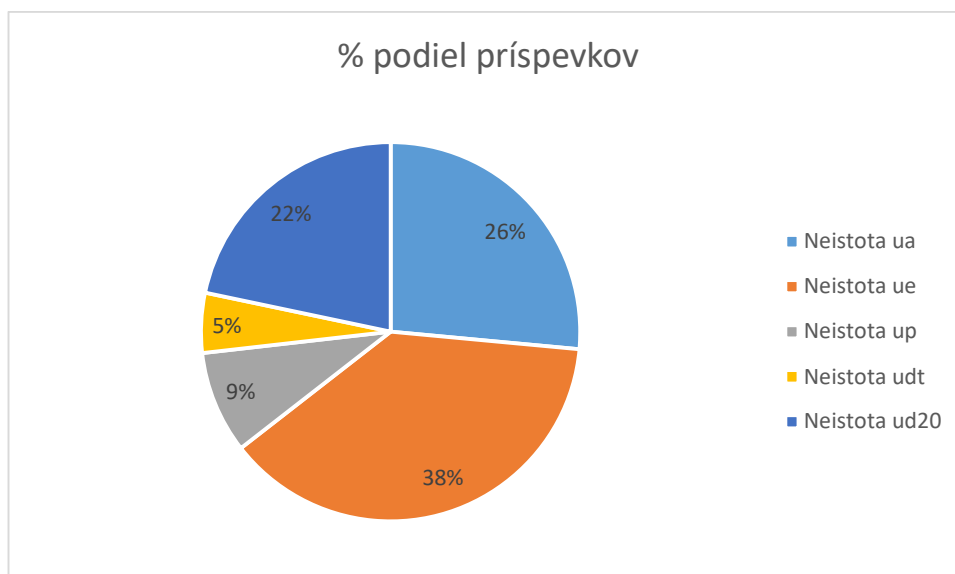
Posledným krokom k stanoveniu neistoty je určenie rozšírenej neistoty. Ak by sme neurčili rozšírenú neistotu, až jedna tretina výsledkov by sa mohla ocitnúť mimo stanovený interval. Aby sme predišli tejto chybe, vynásobíme kombinovanú neistotu koeficientom rozšírenia $k=2$. V tomto prípade bude pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45%. Dosadením do vzťahu (4.6), získame rozšírenú neistotu merania:

$$U = k \cdot u_C = 2 \cdot 0,000345 = 0,0007 \text{ mm} \quad (7.22)$$

Výsledkom teda je, že neistota merania skleneného pravítka v dĺžke 30 mm na prístroji Micro-Vu SOL 311 je 0,0007 mm.

7.5.3 % Podiel príspevkov neistoty k celkovej neistote

Ako môžeme vidieť na priloženom grafe (obr. 46) najväčší podiel na celkovej neistote má neistota použitého etalónu (38%). Naopak najmenší podiel má neistota rozdielu teploty stroja a použitého etalónu (5 %)



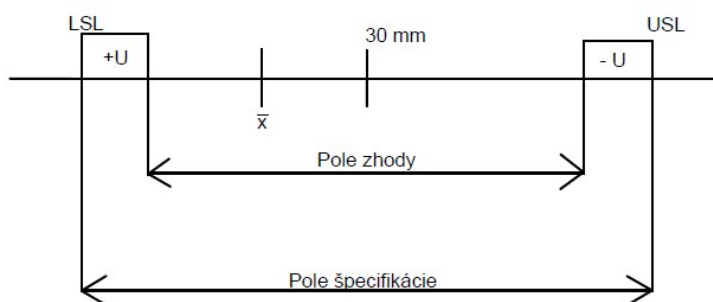
Obr. 46) Graf podielu príspevkov k neistote

Zhoda so špecifikáciami

Výrobcom garantovaná presnosť meracieho stroja je určená vzťahom (5.1).

$$4,5 + L / 150 \mu m = 4,5 + 0,3 / 150 = 4,7 \mu m = 0,0047 mm \quad (7.23)$$

Na obrázku č. 47, môžeme vidieť grafické znázornenie zhody so špecifikáciami. Hodnota LSL – lower specification limit - je dolná hranica špecifikácie (čiže menovitá hodnota – najväčšia dovolená chyba udávaná výrobcom) v našom prípade má hodnotu 30,0047 mm a USL – upper specification limit- čiže horná hranica špecifikácie (menovitá hodnota + najväčšia udávaná chyba výrobcom) pre vzdialenosť 30 mm má hodnotu 29,9953 mm. Nami vypočítaný priemer hodnôt pre vo vzdialenosti L= 30 mm je 29,9997 mm.



Obr. 47) Zhoda so špecifikáciami

7.5.4 Koncové mierky

Pre porovnanie určíme neistotu merania na koncovej mierke veľkosti 30 mm. Na začiatok treba uviesť, že vyhodnocovaná vzdialenosť, vzhľadom na referenčnú mierku, ktorá bola 1 mm, bude 29 mm.

Stanovenie zložky neistoty u_A

Každé meranie na sklenenom pravítku prebiehalo 10 krát. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke č.5

Tab 5) Namerané hodnoty pre L= 29 mm

i	Namerané hodnoty x [mm]
1	28,997218
2	28,997833
3	28,998175
4	28,995257
5	28,997393
6	28,999037
7	29,000591
8	29,000801
9	28,995097
10	28,994064

Výpočet aritmetického priemeru, smerodajnej odchýlky aj samotnej neistoty u_A prebiehal vo výpočtovom programe MS EXCEL. Výpočet je podľa vzťahov uvedených v kapitole 7.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 28,9975 \text{ mm} \quad (7.24)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0,00226 \text{ mm} \quad (7.25)$$

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,000715 \text{ mm} \quad (7.26)$$

Stanovenie zložky neistoty u_e

Neistota spôsobená použitým etalónom sa vypočíta pomocou rozšírenej neistoty uvedenej v kalibračnom liste (obr. č 48).

Měřidlo:	Sada koncových měrek (0,5 ÷ 100) mm; 122 ks; třída přesnosti 0; materiál: ocel
Výrobce; typ měřidla:	Frank
Identifikační číslo:	1286
Použité etalony:	Sada koncových měrek (0,5 ÷ 100) mm, ev.č. 060756 B 88184, sekundární etalon 2. řádu, materiál: ocel; Kalibrační list č. 4011-KL-D0520-18 Zařízení na kalibraci koncových měrek komparační metodou, s vyhodnocovacím modulem, inv.č. D-1005, Kalibrační list 6033-KL-S0006-16
Kalibrační postup:	614-MP-C033
Podmínky prostředí:	Teplota okolí: (20 ± 0,5) °C
Sekundární řád:	3.
Nejistota měření:	$U = (0,1 + 1 \cdot L) \mu\text{m}$, kde L je měřená délka v [m]

Obr. 48) Ukážka kalibračného listu pre koncové mierky [Príloha B]

V KL pre koncové mierky, ktorý je prílohou tejto diplomovej práce je ako rozšírená neistota použitých koncových mierok uvedená rovnica (7.27)

$$U = (0,1 + 1L)\mu\text{m} \quad (7.27)$$

Kde L je meraná dĺžka v metroch. Ako koeficient rozlíšenia bol použitý $k=2$. Zložka neistoty u_e sa pre koncovú mierku $L = 29\text{mm}$ (0,029 m) vyhodnotí nasledovne:

$$u_e = \frac{U}{k} = \frac{0,1 + 1 \cdot 0,029}{2} = 0,0645 \mu\text{m} = 0,000067 \text{ mm} \quad (7.28)$$

Stanovenie zložky neistoty u_p

Zložka neistoty spôsobená rozlišovacou schopnosťou stroja je v celom rozsahu stroja rovnaká. Rovnaký je aj postup výpočtu hodnoty Rozlišovacia schopnosť stroja Micro VU–SOL 311 je 0,1 μm . Predpokladáme rovnomerné rozdelenie, koeficient rovnomerného rozdelenia je $\chi = \sqrt{3}$. Neistoty u_p sa vypočíta dosadením hodnôt do vzťahu (7.5):

$$u_p = \frac{R}{\chi} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,05774 \mu\text{m} = 0,00006 \text{ mm} \quad (7.29)$$

Stanovenie zložky neistoty u_{AT}

Rozdiel teploty stroja a koncovkej mierky je približne 0,2 °C. Koeficient teplotnej rozťažnosti stroja je 11,7 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, koeficient teplotnej rozťažnosti koncovkej mierky je 11,93 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Koeficient citlivosti je 0,343 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Pre túto zložku sa predpokladá tiež rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti a teda $\chi = \sqrt{3}$. Dosadením hodnôt do vzťahu (7.6) získame výslednú zložku neistoty:

$$u_{AT} = \frac{(t_1 - t_2)}{\chi} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115 ^\circ\text{C} \quad (7.30)$$

Stanovenie zložky neistoty u_{A20}

Počas merania na stroji bola v učebni teplota 24,5 °C. V tom prípade je rozdiel teploty od 20°C o 4,5 °C . Koeficient citlivosti je 0,029m. Rozdiel koeficientov teplotnej rozťažnosti $\pm 0,3 \cdot 10^{-6}$

$^6 \text{ K}^{-1}$. Pre tento rozdiel predpokladáme rovnomerné rozdelenie s koeficientom $\chi = \sqrt{3}$. Veľkosť príspevku neistoty je získaná dosadením do vzťahu (7.7):

$$u_{\Delta\alpha} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\chi} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \quad (7.31)$$

$$u_{\Delta t_{20}} = \frac{\Delta t_{20}}{\chi} = \frac{4,5}{\sqrt{3}} = 2,598 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.32)$$

$$u_{T\Delta 20} = u_{\Delta\alpha} \cdot u_{\Delta t_{20}} \cdot L = 0,173 \cdot 2,598 \cdot 0,029 = 0,0130 \text{ } \mu\text{m} = 0,000013 \text{ mm} \quad (7.33)$$

Tab 6) Bilančná tabuľka

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [mm]
u_A	0,00072 mm	normálne	1	0,00072
u_e	0,0007 mm	normálne	1	0,00007
u_p	0,000057 mm	rovnomerné	1	0,000057
$u_{\Delta T}$	0,115 $^\circ\text{C}$	rovnomerné	$L \cdot \alpha$ $= L$ $\cdot 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,00004
$u_{T\Delta 20}$	0,449 $^\circ\text{C}$	rovnomerné	L	0,000013

Neistota typu B sa vypočíta dosadením do vzťahu (7.20):

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = \sqrt{0,00007^2 + 0,000057^2 + 0,00004^2 + 0,00013^2} = 0,000129 \text{ mm} \quad (7.34)$$

7.5.5 Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota sa vypočíta dosadením do vzorca uvedeného v kapitole 3. Zložkami neistoty u_c sú jednotlivé príspevky neistoty zobrazené v bilančnej tabuľke č.6

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,00072^2 + 0,000129^2} = 0,000727 \text{ mm} \quad (7.35)$$

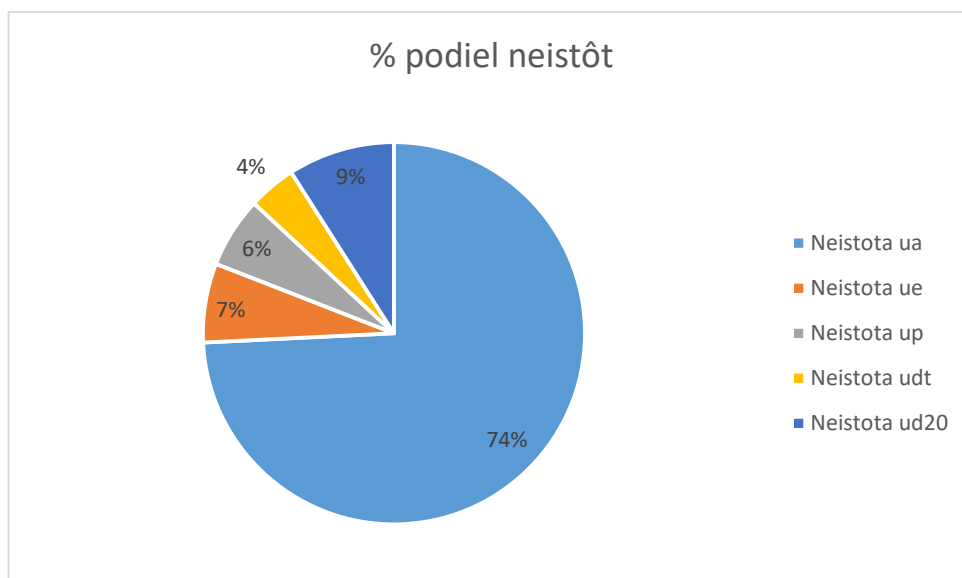
Posledným krokom k stanoveniu neistoty je určenie rozšírenej neistoty. Ak by sme neurčili rozšírenú neistotu, až jedna tretina výsledkov by sa mohla ocitnúť mimo stanovený interval. Aby sme predišli tejto chybe, vynásobíme kombinovanú neistotu koeficientom rozšírenia $k=2$. V tomto prípade bude pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45%. Dosadením do vzťahu 3.5, získame rozšírenú neistotu merania:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,000727 = 0,0015 \text{ mm} \quad (7.36)$$

Výsledkom teda je, že neistota merania koncovej mierky vo veľkosti 0,029 m na prístroji Micro- Vu SOL 311 je 0,0015 mm.

7.5.6 Podiel príspevkov k celkovej neistote

Na obr. č. 49 môžeme vidieť, že najväčší podiel príspevkov k neistote má neistota typu A, čiže variabilita nameraných dát. Je to až 74%. Ostatné neistoty prispievajú približne rovnakým podielom.



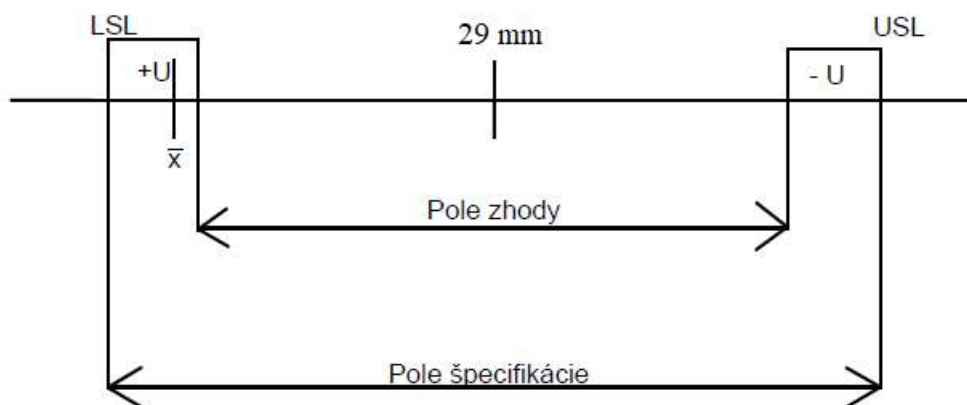
Obr. 49) Podiel príspevkov k neistote

Zhoda so špecifikáciami

V špecifikácii je pre os Z uvedená rovnica (7. 2) po jej dosadení získame výsledok:

$$2,8 + L/100 \mu m = 2,8 + 29/100 = 0,000309 mm \quad (7.37)$$

LSL pre túto os je 28,9969 mm a USL je 29,0031 mm. Ak k hornej a dolnej špecifikácii pripočítame nami vypočítanú neistotu stroja, priemer hodnôt už neleží v poli zhody ale len v poli špecifikácií.



Obr. 50) Grafické znázornenie zhody so špecifikáciami

7.5.7 Laserový interferometer

Ako príklad výpočtu neistoty uvádzame výpočet neistoty v ose Y, vo vzdialenosti 30 mm.

Stanovenie zložky neistoty u_a

Namerané hodnoty laserovým interferometrom vo vzdialenosti $L = 30$ mm sú v tabuľke č. 7.

Tab 7) Namerané hodnoty pre $L = 30$ mm

i	Namerané hodnoty x [mm]
1	29,9979
2	29,9954
3	29,9989
4	29,9982
5	29,9967
6	29,9942
7	29,9939
8	29,9921
9	29,993
10	29,9925

Výpočet aritmetického priemeru, smerodajnej odchýlky aj samotnej neistoty u_A prebiehal vo výpočtovom programe MS EXCEL. Výpočet je podľa vzťahov uvedených v kapitole 7.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 29,995 \text{ mm} \quad (7.38)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0,00250 \text{ mm} \quad (7.39)$$

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,000793 \text{ mm} \quad (7.40)$$

Stanovenie zložky neistoty u_e

Neistota spôsobená použitým etalónom sa vypočíta pomocou rozšírenej neistoty uvedenej v kalibračnom liste. V KL pre laserový interferometer, ktorý je prílohou tejto diplomovej práce je ako rozšírená neistota uvedená rovnica (7.40):

$$U = (0,12 L) \mu\text{m} \quad (7.41)$$

Kde L je meraná dĺžka v metroch. Ako koeficient rozlíšenia bol použitý $k=2$. Zložka neistoty u_e sa vo vzdialenosti $L=30$ mm (0,03 m) vypočíta dosadením do vzťahu (7.4):

$$u_e = \frac{U}{k} = \frac{0,12 \cdot 0,03}{2} = 0,0018 \mu\text{m} = 0,000002 \text{ mm} \quad (7.42)$$

Stanovenie zložky neistoty u_p

Zložka neistoty spôsobená rozlišovacou schopnosťou stroja je v celom rozsahu stroja rovnaká. Rovnaký je aj postup výpočtu hodnoty. Rozlišovacia schopnosť stroja Micro VU–

SOL 311 je $0,1 \mu\text{m}$. Predpokladáme rovnomerné rozdelenie, koeficient rovnomerného rozdelenia je $\chi = \sqrt{3}$. Neistoty u_p sa vypočíta dosadením hodnôt do vzťahu (7.5):

$$u_p = \frac{R}{\chi} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,05774 \mu\text{m} = 0,00006 \text{ mm} \quad (7.43)$$

Stanovenie zložky neistoty $u_{\Delta T}$

Rozdiel teploty stroja a laseru je $0,2^\circ\text{C}$. Koeficient teplotnej rozťažnosti je $11,7 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{K}$. Koeficient citlivosti je $0,403 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Pre túto zložku sa predpokladám tiež rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti a teda $\chi = \sqrt{3}$. Dosadením hodnôt do vzťahu (7.6) získame výslednú zložku neistoty:

$$u_T = \frac{(t_1 - t_2)}{\chi} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,1155 ^\circ\text{C} \quad (7.44)$$

Príspevok k neistote :

$$u_{\Delta T} = u_T \cdot \alpha \cdot L = 0,1155 \cdot 11,7 \cdot 0,03 = 0,04 \mu\text{m} = 0,00004 \text{ mm} \quad (7.45)$$

Stanovenie zložky neistoty $u_{\Delta 20}$

Laserový interferometer využíva kompenzátor XC-80, rozdiel v teplote preto bude len $0,2^\circ\text{C}$. Koeficient citlivosti je $0,03\text{m}$. Rozdiel koeficientov teplotnej rozťažnosti $\pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Pre tento rozdiel predpokladáme rovnomerné rozdelenie s koeficientom $\chi = \sqrt{3}$. Veľkosť príspevku neistoty je získaná dosadením do vzťahu (7.7):

$$u_{\Delta\alpha} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\chi} = \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{3,5}{\sqrt{3}} = 1,155 \quad (7.46)$$

$$u_{\Delta 20} = \frac{\Delta t_{20}}{\chi} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115 ^\circ\text{C} \quad (7.47)$$

$$u_{T\Delta 20} = u_{\Delta\alpha} \cdot u_{\Delta 20} \cdot L = 1,155 \cdot 0,115 \cdot 0,03 = 0,004 \mu\text{m} = 0,000004 \text{ mm} \quad (7.48)$$

Tab 8) Bilančná tabuľka

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [mm]
u_A	0,00083 mm	normálne	1	0,00079
u_e	0,0000018 mm	normálne	1	0,0000018
u_p	0,000057 mm	rovnomerné	1	0,000057
$u_{\Delta T}$	0,115 $^\circ\text{K}$	rovnomerné	$L \cdot \alpha$ $= L$ $\cdot 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,00004
$u_{T\Delta 20}$	0,133	rovnomerné	L	0,000004

Neistota typu B sa vypočíta dosadením do vzťahu (7.20):

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = \sqrt{0,0000018^2 + 0,000057^2 + 0,00004^2 + 0,000004^2} = 0,00007 \text{ mm} \quad (7.49)$$

7.5.8 Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota sa vypočíta dosadením do vzorca uvedeného v kapitole 3. Zložkami neistoty u_c sú jednotlivé príspevky neistoty zobrazené v bilančnej tabuľke č.6

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,00079^2 + 0,00007^2} = 0,000796 \text{ mm} \quad (7.50)$$

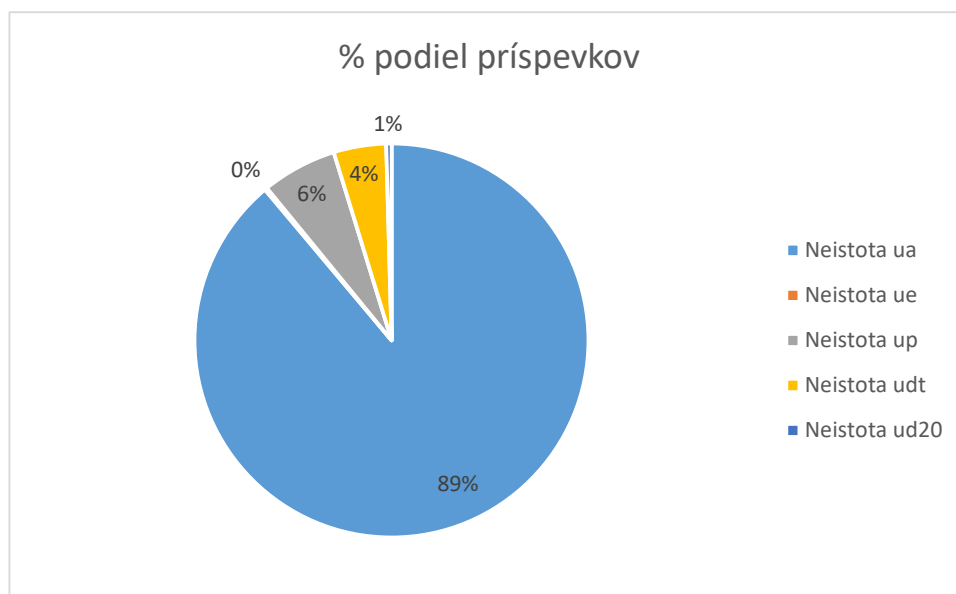
Posledným krokom k stanoveniu neistoty je určenie rozšírenej neistoty. Ak by sme neurčili rozšírenú neistotu, až jedna tretina výsledkov by sa mohla ocitnúť mimo stanovený interval. Aby sme predišli tejto chybe, vynásobíme kombinovanú neistotu koeficientom rozšírenia $k=2$. V tomto prípade bude pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45%. Dosadením do vzťahu 3.5, získame rozšírenú neistotu merania:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,000796 = 0,00159 \text{ mm} \quad (7.51)$$

Výsledkom teda je, že neistota merania laserovým interferometrom vo vzdialenosti $L=0,03 \text{ m}$ na prístroji Micro-Vu SOL 311 je $0,002 \text{ mm}$.

7.5.9 Podiel príspevkov k neistote

Na obr. č. 51, môžeme vidieť, že pri meraní laserom má najväčší % podiel k celkovej neistote merania variabilita nameraných údajov.



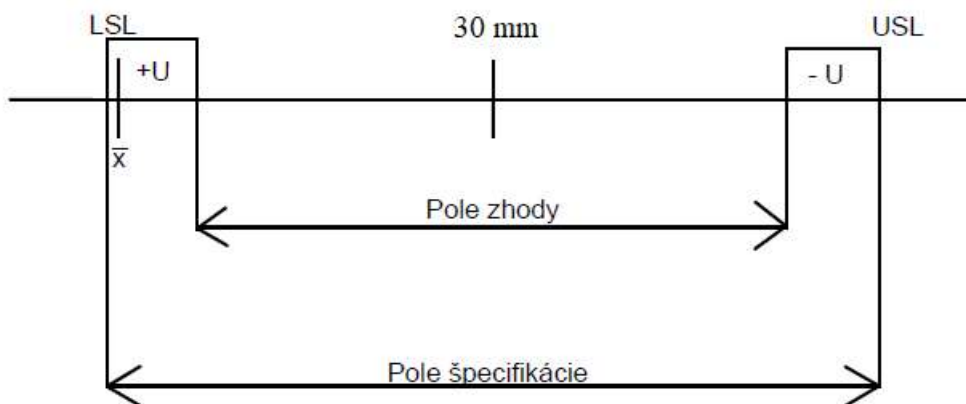
Obr. 51) Graf % podielu príspevkov k celkovej neistote

Zhoda so špecifikáciami

Výrobcom garantovaná presnosť meracieho stroja je určená vzťahom (5.1).

$$4,5 + L / 150 \mu\text{m} = 4,5 + 0,3 / 150 = 4,7 \mu\text{m} = 0,00047 \text{ mm} \quad (7.52)$$

Dolná hranica špecifikácie je 29,9953 mm pre $L = 30$ mm, horná hranica je 30,0047 mm . Po pripočítaní, respektíve odpočítaní rozšírenej neistoty, nám priemer hodnôt vyjde v poli špecifikácie nie však v poli zhody, ako môžeme vidieť na obr. č. 52



Obr. 52) Grafické znázornenie zhody so špecifikáciami

Jednotlivé kalibračné listy pre os X, Y a Z z merania skleneným pravítkom, koncovými mierkami a laserovým interferometrom sú prílohou tejto diplomovej práce.

8 ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou stanovenia neistoty optického meracieho prístroja pomocou laserového interferometra. V práci je popísaný optický merací stroj, ktorý sa nachádza na Fakulte strojného inžinierstva VUT v Brne, na Ústave výrobných strojov, systémov a robotiky.

Prvý cieľom diplomovej práce bol popis súčasného stavu v oblasti merania na optických CMM. Rozdelenie meracích prístrojov a ich popis je uvedený v kapitole číslo 2. V nasledujúcej časti diplomovej práce sa zaoberáme metrologický systémom v ČR a tiež základnými metrologickými pojmami z oblasti presného merania.

Druhým cieľom je popis meracieho prístroja a rozbor riešenej problematiky. Popis meracieho prístroja sa nachádza v kapitole 5. Okrem jednotlivých prvkov je popísaný aj princíp fungovania CCD snímača, hlavného prvku optického systému. V tejto kapitole sú tiež popísané použité etalóny, sklenené pravítko, koncové mierky a laserový interferometer od firmy Renishaw. Okrem popisu stroja je tu tiež zahrnutý merací softvér, ktorý slúži na meranie a zaznamenávanie dát. Problematika stanovenia neistoty merania je rozobratá v kapitole č. 4. Detailnejšie je popísaná substitučná metóda stanovenia neistoty, keďže meranie prebiehalo pomocou etalónov.

Popis jednotlivých meraní na optickom stroji je rozobratý v kapitole číslo 6. Je tu popísaný nie len priebeh merania ale aj tvorba programov na výpočet vzdialenosti v meracom softvéri Inspec.

Štvrtým cieľom bolo stanovenie neistoty pri kalibrácii prístroja Micro-Vu SOL 311. Hlavnou zložkou kapitoly 7 je ukážka stanovenia neistoty na základe nameraných dát. Ukážka je pre vzdialenosť $L=30$ mm, resp. pre koncovú mierku je to $L=29$ mm (vzhľadom na referenčnú mierku 1 mm) identifikovaných boli celkovo 4 zložky, ktoré prispievajú k neistote merania, pričom zložka tepelnej rozťažnosti pozostávala z ďalších, 3 príspevkov neistôt a to rozdielu teploty a koeficientov teplotnej rozťažnosti stroja a meraného predmetu a rozdielu teploty od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základe koláčových grafov, ktoré sme vytvorili z každej ukážky merania, môžeme konštatovať, že najväčšou zložkou neistoty merania je variabilita nameraných dát a odchýlka od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pre zníženie neistoty merania by sme sa mali zamerať hlavne na tieto vplyvy. Jednou z podmienok správnej kalibrácie je aj správna teplota v miestnosti, ktorá by nemala prekročiť $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. To sa nám, aj vzhľadom na to, že meranie prebiehalo v učebni a nie v špeciálnom laboratóriu, nepodarilo dodržať a teplota sa pohybovala okolo $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Významnou zložkou neistoty je vo všetkých prípadoch aj variabilita nameraných dát. Vzhľadom na to, že jednotlivé merania, nerobil vyškolený metroológ je príspevok tejto neistoty pochopiteľný. Ako odporúčanie pre prax by bolo vhodné opätovné skalibrovanie meracieho prístroja skúseným technikom, ktorý pozná správny postup kalibrácie, čím by sa čo najviac eliminovala chyba variability výsledkov. Tiež je potrebné dodržiavať stálu teplotu v laboratóriu. Kalibračné listy optického stroja z jednotlivých meraní etalónmi ako aj interferometrom sú súčasťou tejto diplomovej práce.

Diplomová práca môže slúžiť ako zdroj informácii pre stanovenie neistoty na optickom meracom prístroji. Využitie môže nájsť aj pri vyučovacom procese na ÚVSSR pri laboratórnej výuke s optickým meracím prístrojom.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] A brief history of cmm technology [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://status-cmm.co.uk/blog/a-brief-history-of-cmm-technology/>
- [2] 100 Year Industrial Metrology at Zeiss: ZEISS UMM 500: High precision three coordinate measuring machine. *Zeiss: History* [online]. [cit. 2021-3-14]. Dostupné z: <https://www.zeiss.sk/metrologia/o-nas/history.html>
- [3] *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [cit. 2021-2-14]. Dostupné z: <http://ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [4] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologie a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: VŠB - TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [5] ČSN EN ISO 10360 - 1. *Geometrické požiadavky na výrobky (GPS) - Prejímacie a periodické skúšky súradnicových meracích strojov (CMM) - Časť 1: Slovník*. Praha: Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšebníctvo, 2001, 44 s. Triediaci znak 252011.
- [6] *3D rentgenové měření pro zajištění kvality: Měření a kontrola kompletních součástí* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/rentgenove-systemy/zeiss-metrotom.html>
- [7] KENDER, Štefan. *Súradnicové meracie stroje* [online]. 2013 [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/233-235.pdf>
- [8] Snímací systémy pro souřadnicové měřicí stroje. *MM Priemyslové spektrum* [online]. 18.06.2003 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/snimaci-systemy-pro-souradnicove-merici-stroje>
- [9] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: dimenzionální měření optikou, dotykovým senzorem a počítačovou tomografií. Mnichov: Wert Messtechnik, 2015.
- [10] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ a Lenka ČEPOVÁ. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania* [online]. Žilina, 2014 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>. Štúdijné materiály. ŽU v Žiline, strojnica fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky
- [11] *Obrazové snímače CCD vs. CMOS* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/obrazove-snimace-ccd-cmos.php>
- [12] LC15dx- Closing the gap with tactile probe accuracy [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/en-us/3d-metrology/automated-3d-scanning-lc15dx>
- [13] ŠURKALA, Milan. Fotomobily: Snímací čipy CMOS vs. CCD [online]. 5.10.2009 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>
- [14] Contact and optical sensors: A 360 degree view. In: *Carl Zeiss, Industrial Metrology, LLC* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/\\$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_0001II.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_0001II.pdf)

- [15] KAŤUCH, Peter, Jozef ŽIVČÁK a Radovan HUDÁK. Čo ponúka priemyselná počítačová tomografia? *MM Priemyslové spektrum* [online]. 13. 06. 2012, **2012**(6) [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-ponuka-priemyselna-pocitacova-tomografia>
- [16] *Dino- Lite AM2111* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.dino-lite.cz/cz/am2111>
- [17] TNI 01 0115:2009. *Medzinárodný metrologický slovník - Základné a všeobecné pojmy a pridružené termíny (VIM)*. Praha: Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšebníctvo, 2009, 90 s. Triediaci znak: 83031.
- [18] *Metrológia* [online]. [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <https://www.unms.sk/?Metrologia>
- [19] ŠRÁMEK, Jan. *Stanovení přesnosti měření v nanometrologii*. Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=198907. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [20] *Metrologie v kostce: Třetí upravené a doplněné vydání* [online]. Praha: ÚNMZ, 2009 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf
- [21] *Komentovaný zákon o metrológii* [online]. [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/komentovany%20zakon%20o%20metrologii>
- [22] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 505/1990 Sb. o metrológií. In: *Zákony pro lidi.cz [online]*. 1990. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505>
- [23] *Právní rámec metrologie* [online]. [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/pravni%20ramec%20metrologie>
- [24] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [25] Chyby přímých měření [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz>
- [26] Neistoty merania [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://people.tuke.sk/zuzana.gibova/files/kap-2.2.pdf>
- [27] BREZNICKÁ, Alena. *Metrológia ako základný nástroj získavania objektívnych informácií o meranej veličine*. AT&P journal [online]. 2007, 2007 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/online58.pdf>
- [28] SENFT, Václav. *Analytické vlastnosti metod* [online]. In: . [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: [https://slideplayer.cz/slide/11240670/SENFT, Václav. Analytické vlastnosti metod \[online\]. In: . \[cit. 2021-4-15\]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/11240670/](https://slideplayer.cz/slide/11240670/SENFT, Václav. Analytické vlastnosti metod [online]. In: . [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/11240670/)
- [29] SŁADEK, Jerzy. *Coordinate metrology: accuracy of systems and measurements*. Cham: Springer, [2016]. Springer tracts in mechanical engineering. ISBN 978-3-662-48463-0.
- [30] SOL: Manual Vision System [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <http://depts.washington.edu/mstlab/wordpress/wp-content/uploads/2015/09/MicroVu-Sol-brochure.pdf>
- [31] Katalog měřicích přístrojů 2011 [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <http://www.meridla-nastroje.cz/files/katalogy/Katalog-CZ16001.pdf>
- [32] JANKOVÝCH, Róbert a Ján ŠRÁMEK. *Kalibrace koncových měrek: štúdiijný materiál*. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brne, Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky.

- [33] Laboratórium strojárkej metrológie: Základné mierky rovnobežné a uhlové [online]. Technická univerzita v Košiciach [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/smetrologia/lm1.html#zmr>
- [34] Sada ocelových měrek 112/1. Somet.cz [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://somet.cz/cz/sada-ocelovych-merek-1121>
- [35] ČÍP, Ondřej a Zdeněk BUCHTA. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie: Učebné texty k semináři. 2011.
- [36] Přenosný laserový měřicí a kalibrační systém: Laserový systém XL - 80 [online]. RENISHAW, 2007 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/cs/details/brozuralaserovy-system-xl-80--15088>
- [37] XL-80 laser measurement system [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/xl-80-compensator-and-sensors--8267>
- [38] Types of errors [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://lasertex.eu/support/interferometer-usage-documentation/types-of-errors/>
- [39] Materiály poskytnuté Ing. Jánom Šrámkom, Ph.D
- [40] EA 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibraci. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státníkušebnictví, 2013.
- [41] SKOPAL, Miroslav Jan a Alois FIALA. Kalibrace a přesnost měření. MM Priemyslové spektrum [online]. 2011, 22.11.2011 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni>
- [42] JANKOVÝCH, Róbert. Štatistické nástroje v metrologii. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky.

10 ZOZNAM TABULIEK, OBRÁZKOV, SKRATIEK A PRÍLOH

10.1 Zoznam tabuliek

Tab 1) Charakteristiky skleneného pravítka [31].....	45
Tab 2) Špecifikácia Laser XL80 [36].....	49
Tab 3) Namerané hodnoty pre L=30mm.....	64
Tab 4) Bilančná tabuľka pre L = 30 mm.....	66
Tab 5) Namerané hodnoty pre L= 29 mm.....	68
Tab 6) Bilančná tabuľka.....	70
Tab 7) Namerané hodnoty pre L =30 mm.....	72
Tab 8) Bilančná tabuľka.....	73

10.2 Zoznam obrázkov

Obr. 1) Typ súradnicových strojov: a)Výložníkový, b) Stojanový, c) Portálový d) Mostový [3].....	18
Obr. 2) Typ meracích systémov: a) merací hriadeľ, b) lineárny induktosyn, c) inkrementálna dĺžková stupnica d) laserový interferometer [4].....	21

Obr. 3)	Typ meracích dotyků: a) priamy, b) hviezdicový, c) dotykový[6]	22
Obr. 4)	Typ speciálních dotyků - a) valcový dotyk b) špička c) dutá keramická pologuľa d) dotyk na zastavenie nástrojov[4].....	22
Obr. 5)	Senzor spracovania obrazu [10].....	23
Obr. 6)	Princíp laserového senzoru [11].....	24
Obr. 7)	Laserové meranie, laserový snímač LC15Dx od firmy NIKON [12].....	25
Obr. 8)	Kontrola kvality dielu pomocou počítačovej tomografie[6].....	25
Obr. 9)	Zeiss Viscan – zariadenie využívajúce CCD snímač[13].....	26
Obr. 10)	Dino – Lite – zariadenie využívajúce CMOS snímač[16].....	26
Obr. 11)	Národný metrologický systém v ČR. [20].....	31
Obr. 12)	Delenie chýb merania [25].....	33
Obr. 13)	Vplyvy na výsledok merania[27].....	36
Obr. 14)	Vzťah medzi precíznosťou, pravdivosťou a neistotou merania [28].....	36
Obr. 15)	Optický merací prístroj Micro-Vu SOL 311 [30].....	41
Obr. 16)	Princíp čítania dát na CCD snímači [11].....	42
Obr. 17)	Používateľské rozhranie programu InSpec [autor].....	43
Obr. 18)	Nastavenie tolerancií v program Inspec.....	44
Obr. 19)	Postup pri meraní v programe.....	44
Obr. 20)	Sklenené pravítko [autor].....	45
Obr. 21)	Koncové mierky, ilustračný obrázok.....	46
Obr. 22)	Princíp interferometrického merania [36].....	47
Obr. 23)	Laserový systém Renishaw XL-80 [37].....	47
Obr. 24)	Laser XL- 80 a kompenzátor XC–80 od firmy Renishaw [37].....	48
Obr. 25)	Lineárne meranie laserinterferometrom [38].....	49
Obr. 26)	Používateľské rozhranie Laser TM [39].....	50
Obr. 27)	Kosínusová chyba[40].....	51
Obr. 28)	Abbeho chyba [40].....	52
Obr. 29)	Chyba mŕtvej dráhy [40].....	52
Obr. 30)	Meranie skleneného pravítka [autor].....	53
Obr. 31)	Začiatok programu na meranie pravítka [autor].....	54
Obr. 32)	Meranie koncových mierok [autor].....	55
Obr. 33)	Grafické znázornenie meracích bodov na mierkach [autor].....	55
Obr. 34)	Príprava lasera na meranie [autor].....	56
Obr. 35)	Vyrovnanie laserového lúča, modrý lúč – lúč z odražača, zelený lúč z interferometra. Červený lúč znázorňuje prekrytie oboch lúčov [autor].....	57
Obr. 36)	Prípravok na uchytenie (os X a Y) [autor].....	57

Obr. 37)	Prípravok na uchytenie os Z [autor].....	57
Obr. 38)	Prípravok na uchytenie[43].....	58
Obr. 39)	Prípravok na uchytenie zabudovaný do interferometra[43].....	58
Obr. 40)	Nastavenie meracích bodov v Laser Data Capture.....	58
Obr. 41)	Grafické znázornenie priebehu merania.....	59
Obr. 42)	Prepis dát z programu Inspec do Laser TM	59
Obr. 43)	Grubbsov test odľahlých hodnôt vo vzdialenosti L= 300 mm, osa X.....	63
Obr. 44)	Grubbsov test odľahlých hodnôt L=300 mm po odstránení odľahlej hodnoty, os X.....	63
Obr. 45)	Výstrižok z kalibračného listu skleneného pravítka [Príloha A].....	65
Obr. 46)	Graf podielu príspevkov k neistote.....	67
Obr. 47)	Zhoda so špecifikáciami.....	67
Obr. 48)	Ukážka kalibračného listu pre koncové mierky [Príloha B].....	69
Obr. 49)	Podiel príspevkov k neistote.....	71
Obr. 50)	Grafické znázornenie zhody so špecifikáciami.....	71
Obr. 51)	Graf % podielu príspevkov k celkovej neistote.....	74
Obr. 52)	Grafické znázornenie zhody so špecifikáciami.....	75

10.3 Zoznam použitých symbolov a skratiek

Označenie	Význam
°C	Stupeň Celzia
°K	Stupeň Kelvina
2D	Dvojdimenzionálne
3D	Trojdimenzionálne
α	Koeficient teplotnej rozťažnosti
a i.	A iné
a pod.	A podobne
ASME	The American society of Mechanical engineers
atď.	A tak ďalej
b	Systematická chyba
CCD	Charge- coupled device
c_j	Koeficient citlivosti
CMM	Coordinate measuring machines
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
Č.	Číslo
ČIA	Český inštitút pre akreditáciu
ČMI	Český metrologický inštitút
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
Δ_{t20}	Rozdiel teploty od 20°C
EN	Európska norma
EÚ	Európska únia
χ	Koeficient rozdelenia
FSI	Fakulta strojného inžinierstva
h	Výška
Hz	Hertz
i	Číslo merania
ISO	International organization for Standardization
k	Koeficient rozšírenia
kg	Kilogram
kHz	Kilohertz
kPa	Kilopascal
L	Nominálna hodnota
l	Dĺžka meraného objektu
L_{MER}	Nameraná vzdialenosť

L_{SKUT}	Skutočná vzdialenosť
LSL	Lower specification limit
L_{xx}	Chyba linearity
m	Meter
m/s	Meter za sekundu
mm	Milimeter
ηm	Mikrometre
MPO	Ministerstvo priemyslu a obchodu
n	Počet meraní
napr.	Napríklad
nm	Nanometre
obr.	Obrázok
ppm	Parts per milion, jedna milióntina
QE	Kvantová efektivita
R	Rozlišovacia schopnosť stroja
R_{xy}, R_{xz}, R_{yz}	Funkcia rotačnej chyby
s	Sekunda
Sb.	Zbierka zákonov
SMS	Súradnicový merací stroj
s_x	Smerodajná odchýlka
T	Priemerná teplota kalibrovaného objektu
t_1, t_2	Teplota stroja, objektu
tj.	To je
T_{xy}, T_{xz}	Translačné chyby
U	Rozšírená neistota
u_{LT}	Štandardná neistota dĺžky vplyvom teplotnej rozťažnosti
u_A	Neistota typu A
u_B	Neistota typu B
u_C	Kombinovaná štandardná neistota
u_{cal}	Štandardná neistota kalibrovaného objektu
U_{CAL}	Rozšírená neistota kalibrovaného objektu
$u_{\Delta 20}$	Vplyv rozdielu teplôt od 20°C
$u_{\Delta \alpha}$	Vplyv rozdielu koeficientov teplotnej rozťažnosti
$u_{\Delta T}$	Vplyv rozdielu teplôt etalóna a prístroja
u_E	Štandardná neistota použitého etalónu
U_E	Rozšírená neistota použitého etalónu
UMESS	Merací softvér firmy ZEISS

UMM	Universal measuring machine
ÚNMZ	Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo
u_p	Štandardná neistota postupu merania
u_p	Štandardná neistota rozlišovacej schopnosti stroja
USA	Spojené štáty Americké
USB	Universal series bus – univerzálna sériová zbernica
USL	Upper specification limit – horná hranica špecifikácie
u_T	Zložka neistoty rozdielu teploty stroja a objektu
ÚVSSR	Ústav výrobných strojov, systémov a robotiky
u_w	Štandardná neistota z výrobného procesu
u_{wp}	Štandardná neistota spojená zo zmenami mechanických vlastností
u_{zj}	Príspevok k neistote
VIM	Medzinárodný metrologický slovník
VUT	Vysoké učení technické v Brne
x	Meraná hodnota
\bar{x}, \bar{y}	Priemerná hodnota meranej veličiny

10.4 Zoznam príloh

Príloha A: Kalibračný list koncové mierky

Príloha B: Kalibračný list sklenené pravítko

Príloha C: Kalibračný list laserový interferometer

Príloha D: Prípravok na uchytenie interferometra, rozmery a náčrt

Príloha E: Kalibračný list Micro-VU SOL 311

Príloha F: Kalibračný list Micro-VU SOL 311 – kalibrácia interferometrom

Príloha G: Štatistické vyhodnotenie os Z – mierky

Príloha H: Štatistické vyhodnotenie os X – sklenené pravítko

Príloha I: Štatistické vyhodnotenie os Y – sklenené pravítko

Príloha J Štatistické vyhodnotenie os X – laser

Príloha K Štatistické vyhodnotenie os Y – laser

Príloha L: Štatistické vyhodnotenie os Z – laser

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz		
--	--	--	--

Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-M0055-19

Datum vystavení:	12. června 2019	List 1 ze 2 listů
Zákazník:	ČMI OI Brno, odd. 6014, Okružní 31, 638 00 Brno	
Měřidlo:	Sada koncových měrek (0,5 ÷ 100) mm; 122 ks; třída přesnosti 0; materiál: ocel	
Výrobce; typ měřidla:	Frank	
Identifikační číslo:	1286	
Použité etalony:	Sada koncových měrek (0,5 ÷ 100) mm, ev.č. 060756 B 88184, sekundární etalon 2. řádu, materiál: ocel; Kalibrační list č. 4011-KL-D0520-18 Zařízení na kalibraci koncových měrek komparační metodou, s vyhodnocovacím modulem, inv.č. D-1005, Kalibrační list 6033-KL-S0006-16	
Kalibrační postup:	614-MP-C033	
Podmínky prostředí:	Teplota okolí: (20 ± 0,5) °C	
Sekundární řád:	3.	
Nejistota měření:	$U = (0,1 + 1 \cdot L) \mu\text{m}$, kde L je měřená délka v [m] Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.	
Výsledky kalibrace:	Výsledky kalibrace, uvedené na následujícím listě, byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.	
Datum kalibrace:	6. až 12. června 2019	
Kalibraci provedla:		Zástupce vedoucího oddělení:
 Zdeňka Macháčková		 Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Výsledky kalibrace:

I	II	III
0,5	+0,09	0,09
1	+0,07	0,08
1,0005	+0,07	0,05
1,001	+0,10	0,06
1,002	+0,05	0,06
1,003	+0,04	0,07
1,004	+0,08	0,05
1,005	+0,03	0,07
1,006	+0,04	0,09
1,007	+0,10	0,08
1,008	+0,03	0,07
1,009	+0,04	0,06
1,01	+0,12	0,08
1,02	0,00	0,06
1,03	+0,06	0,08
1,04	+0,02	0,06
1,05	-0,01	0,04
1,06	+0,04	0,05
1,07	+0,07	0,07
1,08	+0,09	0,08
1,09	+0,04	0,08
1,1	+0,11	0,05
1,11	+0,02	0,05
1,12	+0,07	0,06
1,13	+0,01	0,04
1,14	+0,05	0,04
1,15	+0,04	0,06
1,16	+0,12	0,06
1,17	+0,02	0,05
1,18	+0,14	0,03
1,19	+0,06	0,07

I	II	III
1,2	+0,04	0,05
1,21	+0,08	0,03
1,22	-0,01	0,04
1,23	+0,03	0,04
1,24	-0,01	0,07
1,25	+0,02	0,05
1,26	+0,12	0,09
1,27	+0,04	0,05
1,28	-0,03	0,05
1,29	+0,02	0,03
1,3	+0,08	0,08
1,31	+0,03	0,06
1,32	+0,07	0,05
1,33	+0,09	0,06
1,34	+0,11	0,05
1,35	+0,04	0,04
1,36	+0,03	0,05
1,37	+0,06	0,05
1,38	+0,15	0,07
1,39	+0,05	0,05
1,4	-0,03	0,09
1,41	+0,03	0,05
1,42	+0,17	0,09
1,43	+0,05	0,06
1,44	+0,15	0,07
1,45	+0,04	0,05
1,46	-0,04	0,08
1,47	+0,05	0,07
1,48	-0,04	0,06
1,49	+0,05	0,07
1,5	+0,04	0,06

I	II	III
1,6	+0,06	0,06
1,7	+0,19	0,07
1,8	+0,11	0,05
1,9	-0,05	0,07
2	+0,05	0,06
2,5	+0,02	0,05
3	+0,11	0,06
3,5	+0,22	0,07
4	+0,11	0,06
4,5	+0,15	0,07
5	+0,06	0,06
5,5	+0,09	0,08
6	+0,17	0,07
6,5	+0,05	0,09
7	+0,05	0,06
7,5	+0,05	0,07
8	-0,03	0,05
8,5	+0,12	0,06
9	+0,03	0,05
9,5	+0,01	0,05
10	+0,09	0,07
10,5	+0,06	0,08
11	-0,16	0,09
11,5	+0,05	0,08
12	+0,04	0,07
12,5	-0,11	0,05
13	+0,12	0,06
13,5	+0,04	0,08
14	+0,06	0,06
14,5	+0,01	0,05
15	+0,21	0,07

I	II	III
15,5	+0,11	0,06
16	-0,12	0,04
16,5	+0,07	0,07
17	-0,21	0,08
17,5	+0,01	0,03
18	+0,03	0,05
18,5	+0,02	0,05
19	-0,01	0,11
19,5	+0,02	0,09
20	-0,01	0,07
20,5	-0,05	0,07
21	+0,07	0,09
21,5	+0,04	0,06
22	-0,05	0,05
22,5	-0,21	0,04
23	+0,04	0,09
23,5	-0,04	0,06
24	+0,09	0,09
24,5	+0,06	0,05
25	+0,01	0,06
30	-0,14	0,11
40	-0,31	0,15
50	+0,07	0,18
60	+0,02	0,28
70	-0,04	0,33
75	+0,19	0,31
80	+0,12	0,15
90	-0,46	0,19
100	+0,12	0,15

Vysvětlivky:

Sloupec I Jmenovitá délka koncové měrky v [mm]

Sloupec II Úchylka středové délky od jmenovité délky v [μm]

Sloupec III Rozpětí délky v [μm] (souhrnná úchylka rovnoběžnosti a rovinnosti)

Konvenční hodnota délky = jmenovitá délka + úchylka středové délky s uvedeným znaménkem

Největší dovolené úchylky jmenovité délky v libovolném bodě měřicí plochy a tolerance pro rozpětí délky pro Třidu 0 podle ČSN EN ISO 3650:

Jmenovitá délka l_n [mm]	Dovolené úchylky délky ± [μm]	Tolerance rozpětí délky [μm]
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,12	0,1
$10 < l_n \leq 25$	0,14	0,1
$25 < l_n \leq 50$	0,2	0,1
$50 < l_n \leq 75$	0,25	0,12
$75 < l_n \leq 100$	0,3	0,12

Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Brno
Okružní 31
638 00 Brno
-2-



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005.

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

č. 6014-KL-F0050-19

Datum vystavení : 4. dubna 2019

List 1 ze 2 listů

Zákazník : ČMI OI Brno, odd.6014
Okružní 31, 638 00 Brno

Měřidlo : Skleněné měřítko HL2-300

Výrobce : Mitutoyo

Výrobní číslo : 103330

Rozsah : 300 mm

Místo měření : ČMI OI Brno, odd.6014

Etalon :

Název	Identif. č.	Číslo KL
helio-neonový laser Renishaw XL80	56H160	8014-KL-L0026-16

Podmínky prostředí : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,3) °C

Výsledky kalibrace uvedené v tomto kalibračním listě byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě.

Metoda měření : Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu č. 614-MP-C006.

Nejistota měření : $U = (0,5 + 1,0L) \mu\text{m}$ L je měřená délka v metrech

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Datum kalibrace : 4. 4. 2019

Kalibraci provedl :

Zástupce vedoucího oddělení :

Ing. Jan Šrámek



Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů

Výsledky měření stupnice pravítka:

Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená odchylka [μm]
0	počátek měření
20	-0.26
40	-0.14
60	-0.28
80	-0.15
100	-0.37
120	-0.38
140	-0.42
150	-0.41
160	-0.41
180	-0.49
200	-0.48
220	-0.39
240	-0.38
250	-0.31
260	-0.31
280	-0.43
300	-0.43

Pozn.: Měření proběhlo zaměřením na levou hranu rysek.

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Brno
Okružní 31
638 00 Brno
-3-

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz	
Pracoviště: Laboratoře primární metrologie Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5 Oddělení kvantové metrologie délky, tel. +420 257 288 326, fax. +420 257 328 077		
<h2>KALIBRAČNÍ LIST</h2> <h3>8014-KL-L0025-20</h3>		
<p>Tento kalibrační list je v souladu s kalibračními schopnostmi měření (CMCs), které jsou uvedeny v příloze C Ujednání o vzájemném uznávání (MRA) vydaného Mezinárodním výborem pro míry a váhy (CIPM). Podle tohoto Ujednání všechny zúčastněné instituty vzájemně uznávají platnost svých kalibračních listů pro veličiny, rozsahy a nejistoty měření uvedené v příloze C (podrobnosti viz www.bipm.org).</p>		
Datum vystavení:	22. 9. 2020	List 1 ze 7 listů
Zákazník:	ČMI – OI Brno Okružní 31 638 00 Brno	
Měřidlo:	Laserový interferometr pro délková měření laser 633 nm, snímač tlaku a vlhkosti, snímač teploty vzduchu, snímač teploty materiálu (2 ks.)	
Výrobce:	Renishaw, UK	
Typ:	XL-80, XC-80	
Výrobní číslo:	56H160, 63M265, 65G443, 67J876, 67J909	
<p>Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.</p>		
Datum kalibrace:	7.9. – 21.9. 2020	
Kalibraci provedl:	Vedoucí oddělení:	
 Ing. Pavel Mašika		 RNDr. Petr Balling
 Mgr. Petr Křen		
<p><i>Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.</i></p>		

**Metrologická
ná vaznost:**

- vakuové vlnové délky – jódem stabilizovaný He-Ne laser (ECM 110-1/08-036)
- interferometrický komparátor IK-1 (ECM 110-1/08-036)
- teploty – odporový teploměr Pt100 (1012-KL-55010-17)
- atmosférického tlaku – barometr Vaisala (6013-KL-C0947-18)
- vlhkosti vzduchu – vlhkoměr Vaisala (6036-KL-V0588-16)

Kalibrační postup:

metoda pro měření na laserovém interferometrickém komparátoru IK-1 (814-MP-C405)

Místo kalibrace:

Laboratoře primární metrologie Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5

Podmínky prostředí:

teplota prostředí $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $(65 \pm 10) \%$

Výsledky kalibrace:**I. Určení vakuové vlnové délky frekvenčně stabilizovaného He-Ne laseru a měření její
krátkodobé a dlouhodobé časové stability.**

Etalonovým laserem je He-Ne laser 633 nm, který je frekvenčně stabilizovaný pomocí jevu saturované absorpce molekuly $^{127}\text{I}_2$ v kyvetě umístěné uvnitř rezonátoru laseru. Stabilizace je přitom provedena na jednu z hyperjemných komponent rotačně-vibračního přechodu R(127) 11-5 molekuly jódu.

Konstrukce laseru a provozní podmínky jsou v souladu s doporučeními CIPM pro praktickou realizaci metru. Absolutní frekvence vyzařovaná tímto referenčním laserem je známa s relativní nejistotou $5 \cdot 10^{-11}$.

Před prováděním samotného měření frekvence generované testovaným laserem byl výstup laseru zkoumán na přítomnost parazitních transverzálních či dalšího podélného módu, které by mohli mít negativní vliv na měření.

Následně bylo provedeno měření frekvence (vakuové vlnové délky) záření generovaného He-Ne laserem a měření frekvenční stability. Radiofrekvenční záznamový signál laserů byl detekován na rychlé lavinové fotodiodě a přiveden na vstup čítače.

Mezi jednotlivými úseky měření frekvence (vakuové vlnové délky) byl kalibrován frekvenčně stabilizovaný laser několikrát vypnut a znovu zapnut na různé doby trvání měření (respektive vypnutí).

Výsledky měření:

Z dlouhodobého měření frekvence (vakuové vlnové délky) laseru byla určena střední frekvence a vakuová vlnová délka kalibrovaného laseru a příslušná relativní nejistota měření:

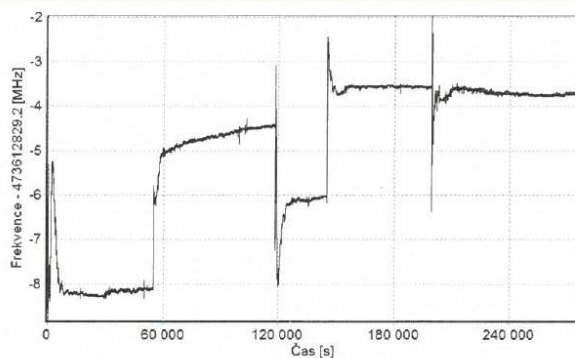
$$\begin{aligned} f_0 &= (473\,612\,823,3 \pm 2,4) \text{ MHz, tedy } \pm 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ relativně} \\ \lambda_0 &= 632\,990\,584,8 \text{ fm} \end{aligned}$$

Systém měřidla předpokládá frekvenci a vakuovou vlnovou délku

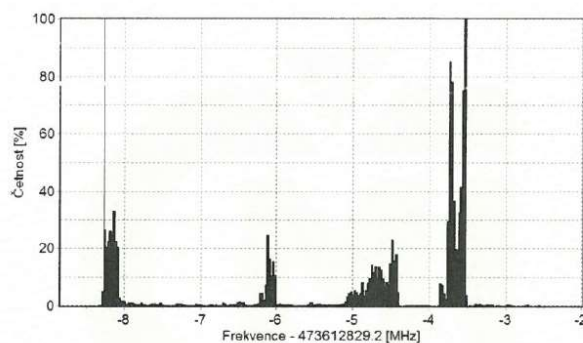
$$\begin{aligned} f_0 &= 473\,612\,829,2 \text{ MHz} \\ \lambda_0 &= 632\,990\,577,0 \text{ fm} \end{aligned}$$

a tedy rozdíl δ činní **+5,9 MHz**.

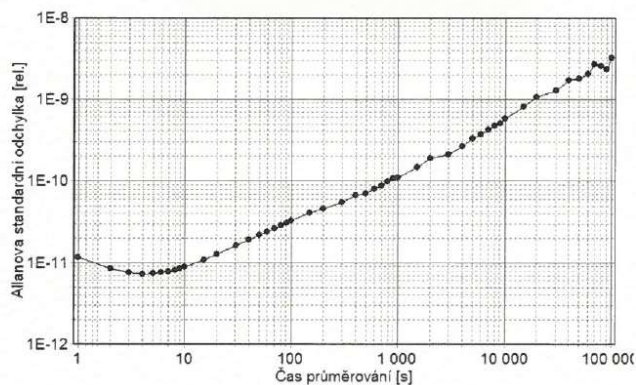
Stabilitu frekvence laseru ukazují grafy na následující straně:



Graf naměřených frekvenčních rozdílů kalibrovaného laseru. (na časové ose měření nejsou uvedeny úseky během nichž byl laser vypnut, zobrazeno v průměrování pro vzorky délky trvání 1 sekunda)



Histogram naměřených hodnot popisující jejich statistické rozložení.



Allanova standardní odchylka charakterizující šumové vlastnosti a časovou stabilitu frekvence kalibrovaného laseru.

II. Kalibrace snímačů systému automatické korekce vlnové délky.

a) Snímač teploty vzduchu.

Snímač teploty vzduchu byl porovnán s etalonovými teploměry Pt100 v tepelně izolovaném prostředí (za tmy) s homogenitou teploty lepší než 0,03°C.

Výsledky měření:

Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce, kde údaje tvoří průměry hodnot z několika odečtů:

teplota	teploměr		nejist.
etalon	65G443		
t ₉₀	údaj	δ	U _c
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
9,996	9,95	-0,05	0,05
14,963	14,91	-0,05	0,05
19,828	19,77	-0,06	0,05
25,022	24,95	-0,07	0,05
30,005	29,93	-0,07	0,05

b) Snímače teploty materiálu:

Snímač teploty materiálu byl porovnán s etalonovými teploměry Pt100 v tepelně izolovaném prostředí (za tmy) s homogenitou teploty lepší než 0,03°C.

Výsledky měření:

Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce, kde údaje tvoří průměry hodnot z několika odečtů:

teplota	teploměr		teploměr		nejist.
etalon	67J876		67J909		
t ₉₀	údaj	δ	údaj	δ	U _c
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
9,996	9,95	-0,04	9,96	-0,04	0,05
14,963	14,92	-0,04	14,93	-0,04	0,05
19,828	19,79	-0,04	19,79	-0,03	0,05
25,022	24,97	-0,05	24,98	-0,05	0,05
30,005	29,96	-0,05	29,96	-0,04	0,05

c) Snímač atmosférického tlaku:

Čidlo atmosférického tlaku bylo přímo porovnáváno s etalonem tlaku.

Výsledky měření:

Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce, kde údaje tvoří průměry hodnot z několika odečtů:

etalon	údaj barometru	rozdíl	nejistota kalibrace
	63M265	δ	U_c
[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]
993,83	994,60	0,77	0,32
998,73	999,40	0,67	0,32
1000,92	1001,60	0,68	0,32
1002,27	1003,00	0,73	0,32
1003,98	1004,60	0,62	0,32

d) Snímač relativní vlhkosti vzduchu:

Čidlo relativní vlhkosti vzduchu byl přímo porovnáváno s etalonem vlhkosti vzduchu. Nejistota měření byla rozšířena na 5 % díky závislosti chyby kalibrovaného snímače na době od zapnutí.

Výsledky měření:

Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce, kde údaje tvoří průměry hodnot z několika odečtů:

etalon	údaj vlhkoměru	rozdíl
	63M265	δ
[%]	[%]	[%]
63	66	3
65	67	2
67	68	1
68	69	1
69	69	0

III. Systémový test laserového interferometru.

Systémový test kalibrovaného laserového interferometru (dále LI) je prováděn na referenční aparatuře laserového interferometrického komparátoru IK-1. Ten obsahuje jako zdroj monochromatického záření laser OL-1 generující na vlnové délce 633 nm. Jeho frekvence je stabilizována na nastavitelný offset od primárního etalonu tak, že výsledná nejistota frekvence emitovaného záření je $1 \cdot 10^{-10}$ relativně. IK-1 dále obsahuje dvouprůchodový polarizačně kódovaný interferometrický systém s pevnou referenční větví a pohyblivou větví měřicí, která je realizována koutovým odražečem umístěným na stolku lineárního vedení optické lavice s rozsahem pohybu více než 1 m s rychlostí pohybu přibližně 1 cm/s.

Automatická kompenzace vakuové vlnové délky je zajišťována nezávislým systémem pro monitorování parametrů prostředí obsahujícím snímače teploty prostředí, atmosférického tlaku a relativní vlhkosti vzduchu, které jsou navázané na příslušné etalony.

Nejistota měření interferometrického komparátoru je dána výrazem $Q[0,001; 0,1 \cdot L] \mu\text{m}$, kde L je délka komparační větve v [m].

Kalibrovaný laserový interferometr je porovnán s etalonem tak, že jeho měřicí větev je ztotožněna s měřicí větví interferenčního komparátoru IK-1 tak, že měřicí osy se odchylují o méně než 150 μrad a obě zařízení provádějí měření posunutí stejného koutového odražeče ze systému IK-1.

Systémový test laserového interferometru obsahuje následující měření. Jejich kombinace zajišťuje nezávislý test systému detekce posuvu interferenčních proužků a systému kompenzace vlnové délky:

1) Test systému detekce posuvu interferenčních proužků kalibrovaného LI. Toto porovnání neobsahuje vliv čidel na systém kompenzace vakuové vlnové délky.

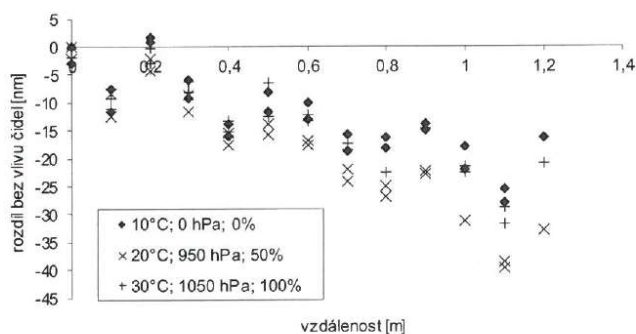
2) Posouzení kalibrovaného LI v jeho komplexním měřicím účinku včetně aktivního systému automatické kompenzace vlnové délky jeho porovnáním s etalonem IK-1, jehož vakuová vlnová délka je přitom také automaticky kompenzována podle parametrů prostředí vlastním systémem.

V obou případech je vypnuta kompenzace roztažnosti materiálu: $\alpha = 0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Výsledky měření:

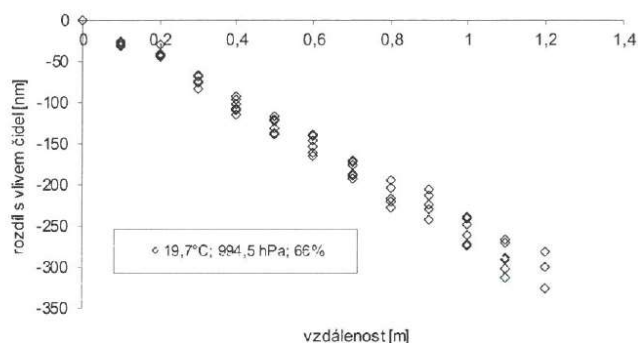
1) Pro kalibraci systému pro detekci posuvu interferenčního pole kalibrovaného laserového interferometru byly, podle výše uvedené metodiky, provedeny série měření s krokem přibližně 100 mm. U LI i IK-1 tedy byly vypnuty automatické kompenzace vlnové délky – parametry prostředí do systému zadány manuálně (hodnoty jsou uvedeny v legendě následujícího grafu).

Graf naměřených diferencí v závislosti na aktuální délce komparační větve:



2) Pro otestování komplexního měřicího účinku kalibrovaného laserového interferometru, tedy včetně systému automatické kompenzace vlnové délky, byla provedena série měření za uvedených laboratorních podmínek. Krok posuvu interferenčního komparátoru mezi jednotlivými odměry byl 100 mm.

Průměrná **chyba délkového měření** kalibrovaného systému od etalonu za daných podmínek je v relativním vyjádření **-0,26 $\mu\text{m}/\text{m}$** , a její rozšířená směrodatná odchylka pro $k=2$ byla **0,03 $\mu\text{m}/\text{m}$** . Graf naměřených diferencí mezi hodnotou etalonu a kalibrovaného systému v závislosti na aktuální délce komparační větve je uveden níže.



Výsledná hodnota a nejistota měření kalibrovaného laserového interferometru.

Naměřenou hodnotu vzdálenosti je **třeba korigovat** na správnou vlnovou délku za daných podmínek: tedy správným výpočtem indexu lomu (například pomocí Edlénovy formule) se započtením korekcí vakuové vlnové délky, snímačů a také na vliv teplotní roztažnosti materiálu pro rozdíly zjištěné při kalibraci (protože najustování nebylo provedeno). Při běžných atmosférických podmínkách je relativní korekce délky pro užitou vlnovou délku 633 nm v závislosti na rozdílu hodnot v systému interferometru od etalonových hodnot rovna přibližně -0,0021 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MHz}$ frekvence laseru, -0,27 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{hPa}$, 0,95 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ teploty vzduchu, 0,009 $\mu\text{m}/\text{m}/\%$ vlhkosti, 11 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ rozdílu čidla teploty materiálu při koeficientu tepelné roztažnosti 11 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$.

Na základě výsledků měření uvedených v odstavcích I., II. a III. byla stanovena výsledná nejistota laserového interferometru při měření vzdálenosti ve směru a v poloze svazku a po započtení všech korekcí jako kvadratická kombinace nejistot měření všech jeho jednotlivých komponent.

$$U = Q[0,01 ; 0,12 \cdot L ; 0,05 \cdot \alpha \cdot L] \mu\text{m},$$

kde L je měřená délka vyjádřená v [m], α je koeficient teplotní roztažnosti materiálu vyjádřený v [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$].

Pokud tyto dodatečné korekce nejsou provedeny, je výsledná nejistota měření

$$U = Q[0,01 ; 0,39 \cdot L ; 0,08 \cdot \alpha \cdot L] \mu\text{m}$$

v rozsahu hodnot parametrů prostředí, ve kterém byla provedena tato kalibrace.

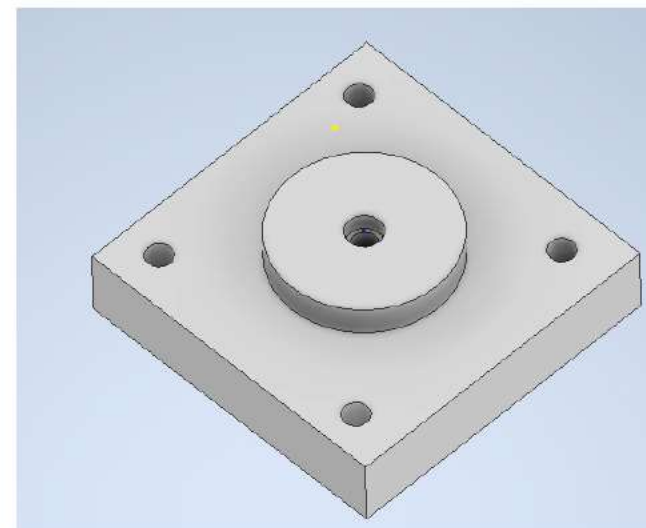
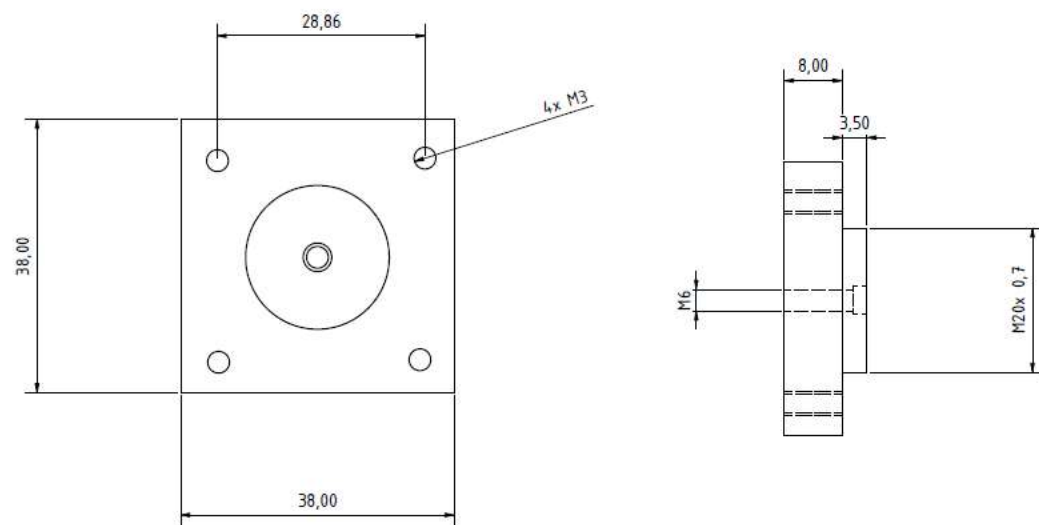
Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut
Laboratoře primární metrologie
V Botanice 4
150 72 Praha
-5-

Prípravok na upevnenie

Na upevnenie interferometra bol použitý prípravok s nasledujúcimi rozmermi, bol vytlačený na 3D tlačiarňi. Hodnoty rozmerov sú uvedené v mm.





Kalibran List .:1

Dátum vystavenia: 19. 05. 2021

List 1 z 7 listov

Zákazník:

Meradlo: Optick merací stroj SOL 311 Merací rozsah: X: 0 - 315 mm;
Výrobca: Micro-Vu Y: 0 - 315 mm
Typ meradla: optick stroj
Rozlitelnst: 0,1 μ m

Použité etalóny:

<i>Názov:</i>	<i>Vr. slo</i>	<i>slo KL</i>
Sklenené pravítko HL 2-300	10330	6014-KL-F0050-19
Koncov mierky	1286	6014-KL-M0055-19

Kalibran postup: Priama metóda

Teplota okolia: $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$

Neistota merania: $Os\ X: (0,35 + 0,01\ L)$
 $Os\ Y: (0,5 + 0,009\ L)$
 $Os\ Z: (0,14 + 0,15\ L)$

L je vzdialenosť v [mm].

štandardná neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA - 4/02. Uvedená rozrena neistota merania je sinom štandardnej neistoty merania s koeficientom k, ktor odpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95%, čo pri normálnom rozdelení odpovedá koeficientu rozlíšenia $k=2$.

Výsledky kalibrácie:

Výsledky kalibrácie boli získané za podmienok a s pouitm postupov, uvedenh v tomto kalibračnom liste a vzťahujú sa len k dobe a miestu kalibrácie.



FAKULTA stav výrobnch strojů, STROJNHO systmv INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojnho inžinierstva, stav výrobnch strojů, systmv a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledky os X

Namerané dáta

Meranie	Menovitá hodnota [mm]									
	30,0000	60,0000	90,0000	120,0000	150,0000	180,0000	210,0000	240,0000	270,0000	300,0000
1	29,9997	60,0010	89,9997	120,0001	149,9992	180,0002	209,9987	240,0001	269,9989	299,9982
2	29,9998	60,0005	89,9999	119,9998	150,0000	179,9992	209,9994	239,9987	269,9983	299,9981
3	29,9990	59,9999	90,0000	119,9985	149,9994	179,9985	209,9975	239,9970	269,9989	299,9971
4	30,0008	60,0012	90,0000	120,0005	150,0007	180,0004	210,0001	239,9990	269,9998	299,9977
5	29,9991	59,9995	89,9988	120,0001	149,9995	179,9982	209,9986	239,9970	269,9968	299,9973
6	30,0000	59,9998	89,9999	119,9997	149,9999	179,9995	209,9991	239,9985	269,9977	299,9971
7	29,9994	59,9995	89,9991	119,9992	149,9989	179,9984	209,9992	240,0002	269,9989	299,9972
8	29,9998	60,0004	89,9996	120,0003	150,0002	180,0008	209,9994	239,9983	269,9981	299,9980
9	30,0004	60,0010	89,9996	120,0007	149,9996	180,0007	209,9993	239,9996	269,9996	299,9972
10	29,9997	60,0002	89,9993	120,0002	149,9998	179,9988	209,9982	239,9981	269,9986	
Priemer [mm]	29,9998	60,0003	89,9996	119,9999	149,9997	179,9995	209,9990	239,9987	269,9986	299,9975
u_A [μ m]	0,1750	0,1973	0,1260	0,2067	0,1619	0,3117	0,2293	0,3538	0,2772	0,1598

Prspevky k celkovej neistote

Ukzka pre $L = 0,03$ m

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [μ m]
u_A	0,1750 μ m	normálne	1	0,1750
u_e	0,2515 μ m	normálne	1	0,2515
u_p	0,0578 μ m	rovnomerne	1	0,0578
$u_{\Delta T}$	0,115 $^{\circ}$ C	rovnomerne	$L \cdot \alpha$ $= L \cdot 8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	0,0337
$u_{T\Delta 20}$	0,133	rovnomerne	L	0,1435

Neistota u_B :

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = 0,2972 \mu m$$

Kombinovaná:

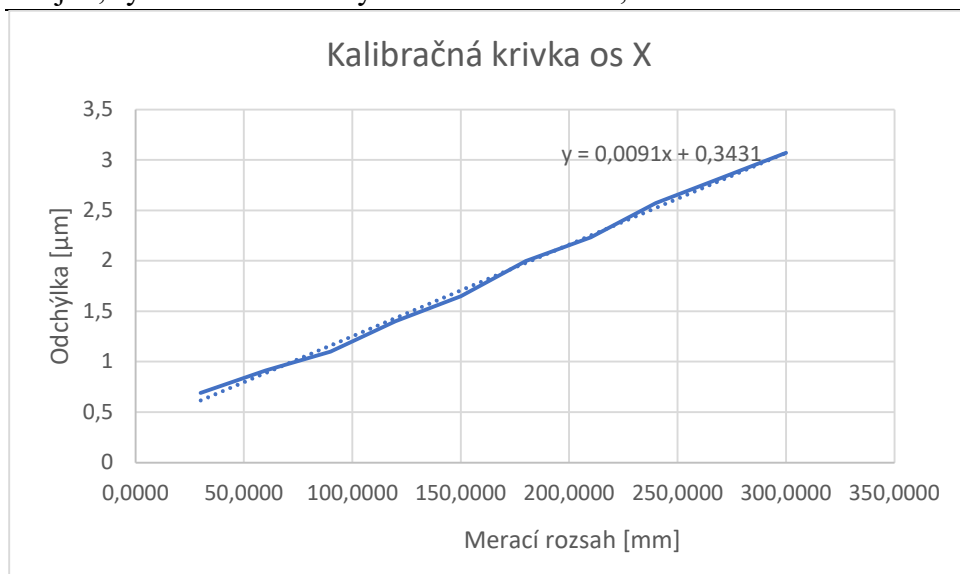
$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,3449 \mu m$$

Rozırena neistota pre $L = 0,03$ m

$$U = 2 \cdot u_c = 0,6897 \mu m$$



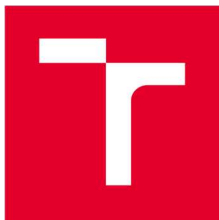
Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 602 00 Brno.



Rozšířená neistota os X :

$$U = 0,35 + 0,01 L$$

L je vzdálenost' v [mm]



FAKULTA ústav výrobnch strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technick v Brne, Fakulta strojního inžinierstva, Ústav výrobnch strojov, systémov a robotiky. Technick 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledky os Y

Meranie	Menovit hodnota [mm]									
	30,0000	60,0000	90,0000	120,0000	150,0000	180,0000	210,0000	240,0000	270,0000	300,0000
1	29,9976	59,9972	89,9960	119,9965	149,9949	179,9950	209,9947	239,9955	269,9958	299,9921
2	29,9985	59,9972	89,9977	119,9965	149,9954	179,9951	209,9948	239,9964	269,9970	299,9918
3	29,9986	59,9979	89,9973	119,9967	149,9955	179,9967	209,9950	239,9973	269,9969	299,9917
4	29,9984	59,9981	89,9984	119,9963	149,9952	179,9959	209,9947	239,9963	269,9960	299,9928
5	29,9984	59,9985	89,9975	119,9991	149,9968	179,9978	209,9964	239,9962	269,9979	299,9934
6	29,9995	59,9992	89,9980	119,9989	149,9968	179,9968	209,9965	239,9967	269,9983	299,9932
7	29,9996	59,9989	89,9988	119,9990	149,9983	179,9968	209,9971	239,9976	269,9975	299,9934
8	29,9987	59,9983	89,9989	119,9978	149,9971	179,9967	209,9961	239,9971	269,9975	299,9932
9	29,9998	59,9996	89,9984	119,9992	149,9989	179,9979	209,9970	239,9985	269,9988	299,9937
10	29,9998	60,0000	89,9987	119,9989	149,9972	179,9964	209,9982	239,9982	269,9979	299,9936
Priemer [mm]	29,9989	59,9985	89,9980	119,9979	149,9966	179,9965	209,9960	239,9970	269,9974	299,9929
u_A [μ m]	0,2325	0,2998	0,2842	0,4019	0,4224	0,3073	0,3863	0,2982	0,3012	0,2381

Prspevky k celkovej neistote

Ukka pre $L = 0,03$ m

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [μ m]
u_A	0,2325 μ m	normálne	1	0,2325
u_e	0,2615 μ m	normálne	1	0,2615
u_p	0,0578 μ m	rovnomen	1	0,0578
$u_{\Delta T}$	0,115 $^{\circ}$ C	rovnomen	$L \cdot \alpha$ $= L \cdot 8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	0,0337
$u_{T\Delta 20}$	0,133	rovnomen	L	0,1435

Neistota u_B :

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = 0,2972 \mu\text{m}$$

Kombinovan neistota:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,3773 \mu\text{m}$$

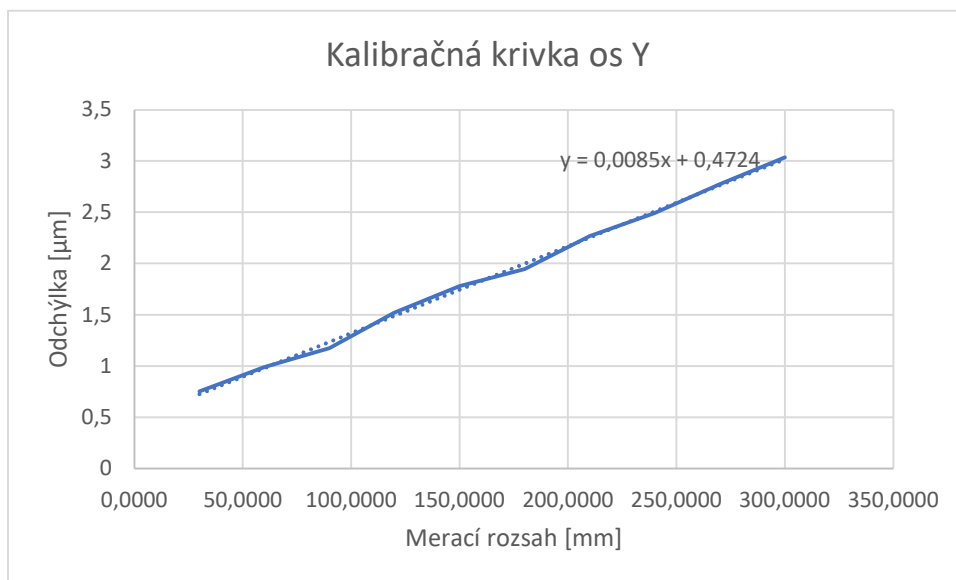
Rozšíren neistota pre $L = 0,03$ m

$$U = 2 \cdot u_c = 0,7546 \mu\text{m}$$



Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 602 00 Brno.

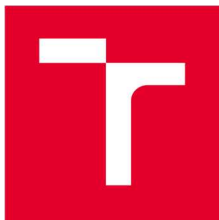
Kalibrační křivka



Rozšířená neistota:

$$U = 0,009 L + 0,5$$

L je vzdálenost v [mm].



FAKULTA ústav výrobnch strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojního inžinierstva, Ústav výrobnch strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledky os Z

Meranie	Menovitá hodnota [mm]									
	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99
1	8,9994	19,0041	28,9972	39,0040	48,9895	58,9979	68,9960	78,9874	88,9978	98,9776
2	8,9997	19,0034	28,9978	38,9937	48,9963	59,0059	68,9987	78,9913	88,9976	98,9877
3	8,9991	18,9995	28,9982	38,9993	48,9962	58,9887	68,9896	79,0050	88,9892	98,9774
4	8,9978	19,0037	28,9953	38,9971	48,9983	59,0040	68,9964	78,9855	88,9941	98,9879
5	9,0001	19,0033	28,9974	38,9891	48,9975	59,0035	68,9861	78,9941	88,9877	98,9880
6	8,9996	19,0002	28,9990	38,9946	48,9986	58,9959	69,0049	79,0016	88,9848	98,9990
7	8,9981	19,0028	29,0006	38,9983	48,9963	59,0054	68,9973	78,9964	88,9786	98,9773
8	8,9991	19,0018	29,0008	38,9938	48,9914	59,0018	68,9965	78,9931	88,9986	98,9718
9	8,9986	19,0053	28,9951	38,9964	48,9949	58,9967	68,9873	79,0022	88,9976	98,9806
10	8,9990		28,9941	38,9961	48,9957	59,0013	68,9979	78,9898	88,9854	98,9817
Priemer [mm]	8,9990	19,0027	28,9975	38,9963	48,9955	59,0001	68,9951	78,9946	88,9911	98,9829
u_A [μ m]	0,2263	0,6269	0,7153	1,3173	0,9193	1,6859	1,8160	2,0796	2,2068	2,4786

Príspevky k celkovej neistote

Ukážka pre $L = 0,029$ m

Zložka neistoty	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok k neistote [μ m]
u_A	0,7153 μ m	normálne	1	0,7153
u_e	0,0645 μ m	normálne	1	0,0645
u_p	0,0578 μ m	rovnomerné	1	0,0578
$u_{\Delta T}$	0,115 $^{\circ}$ C	rovnomerné	$L \cdot \alpha$ $= L$ $\cdot 11,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	0,0392
$u_{T\Delta 20}$	0,133	rovnomerné	L	0,0130

Neistota u_B :

$$u_B = \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{T\Delta 20}^2} = 0,1288 \mu m$$

Kombinovaná neistota:

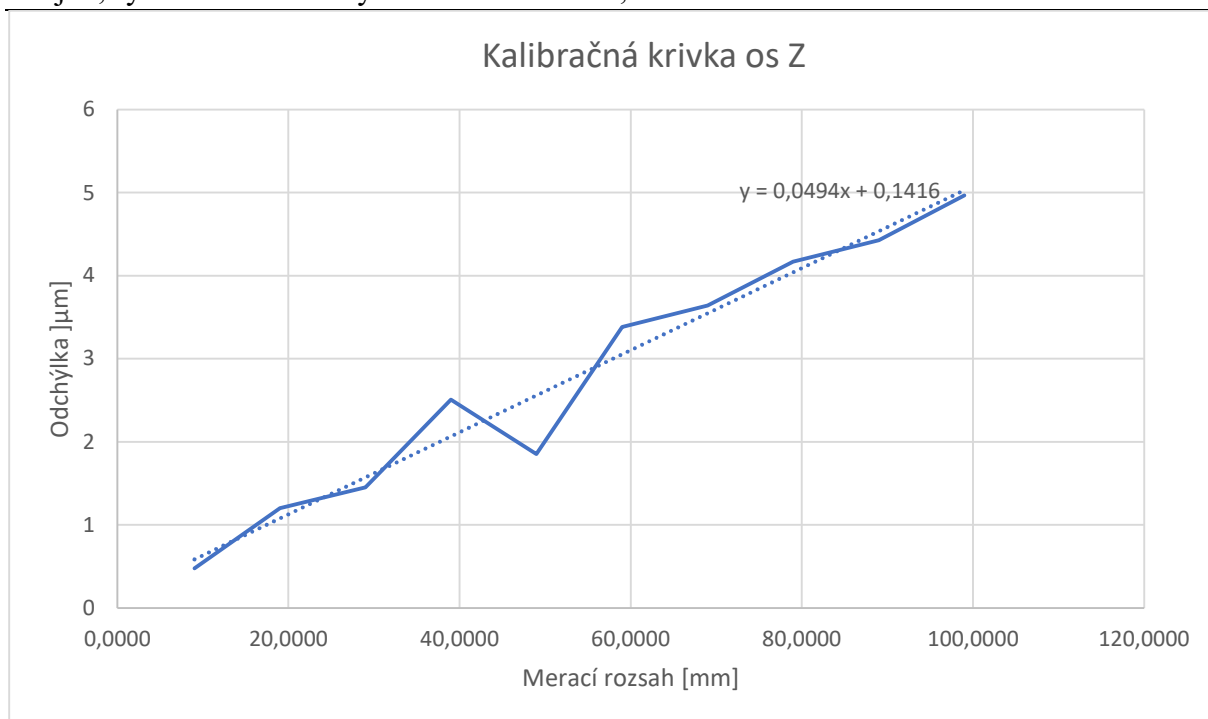
$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,7269 \mu m$$

Rozšírená neistota pre $L = 0,03$ m

$$U = 2 \cdot u_c = 1,4537 \mu m$$



Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.



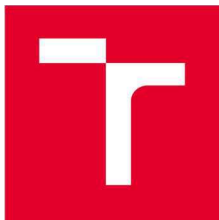
Neistota v ose Z

$$U = 0,05 L + 0,14$$

Kde L je vzdálenost v [mm].

Dátum kalibrace: 20.03.2021

Kalibraci vykonala: Bc. Silvia Fulová



Kalibran List

.:2

Dátum vystavenia: 19. 05. 2021

List 1 z 11 listov

Zákazník:

Meradlo: Optick merací stroj SOL 311 Merací rozsah: X: 0 - 315 mm;
Výrobca: Micro-Vu Y: 0 - 315 mm
Typ meradla: optick sradnicov stroj Z: 0 - 150 mm
Rozlшитel'nost': 0,1 µm

Pouit etalóny:

Názov: Vr. íslo slo KL
Laserov interferometer 56H160 8014-KL-L0025-20

Kalibran postup:

 Priama metóda

Výsledky kalibrácie boli zskan za podmienok zaznamenaných v tomto kalibračnom liste, vzťahujú sa len k dobe a miestu uskutočnenia kalibrácie.

Teplota okolia: (25±2)°C

Neistota merania: **X: (0,04 L + 0,3)**

Y: (0,04 L + 1,2)

Z: (0,03 L + 7,3)

L je vzdialenosť v [mm].

tandardna neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA - 4/02. Uvedená rozrena neistota merania je súčinom štandardnej neistoty merania s koeficientom k, ktor odpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95%, čo pri normálnom rozdelení odpovedá koeficientu rozlíšenia k = 2.

Výsledky kalibrácie: Výsledky kalibrácie sú rozdelené do jednotlivých osí (X, Y a Z)

Podmienky okolia:

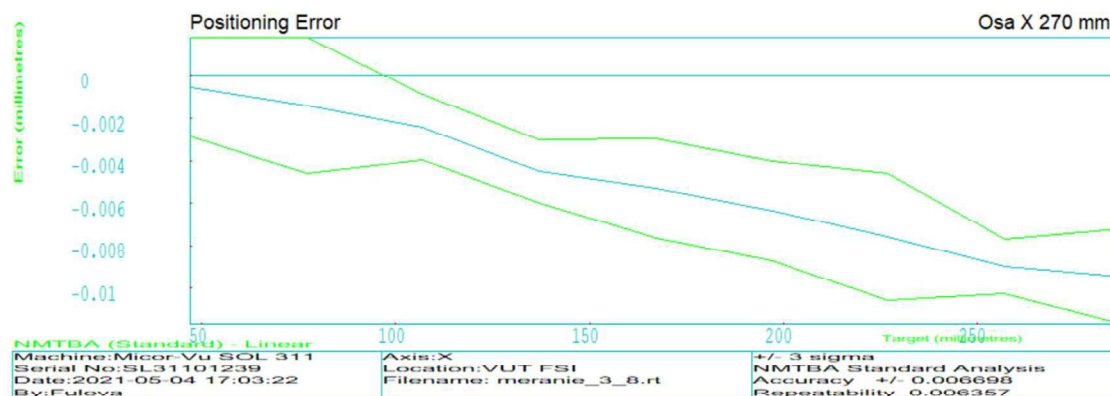
RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM			
ENVIRONMENT DATA PRINT-OUT			
Mode : Linear displacement		File: meranie_4_4.rtl	
Machine: Micor-Vu SOL 311		Serial No: SL31101239	
Date: 2021-05-04 18:59:06		By: Fulova	
Axis: Z		Location: VUT FSI	
TITLE: Osa Z 150 mm			
Data	Start	End	Units
Time	2021-05-04 18:59:10	2021-05-04 19:10:10	
Air temperature	25.87	25.93	deg C
Air pressure	967.80	968.00	mbar
Rel. humidity	26.70	26.90	%
Material Temperature 1	26.29	26.30	deg C
Material Temperature 2	--NC--	--NC--	deg C
Material Temperature 3	--NC--	--NC--	deg C
Exp. Coeff	11.70	11.70	ppm/deg C
Environment factor	0.31639160	0.31639157	



FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledky měření os X



Pozn.:

Error – chyba (indikácia) prístroja, údaj prístroja mínus konvenčne pravá hodnota

Modrá krivka – aritmetický priemer všetkých hodnôt

Zelená krivka – dvojnásobok smerodajnej dochýlky

Repeatability – opakovateľnosť

```
RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM
ERROR COMPENSATION TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 17:03:22
Axis: X
TITLE: Osa X 270 mm

Serial No: SL31101239
By: Fuleva
Location: VUT FSI
Filename: meranie_3_8.rtl

Table type
Compensation type
Compensation resolution
Sign convention
Reference position
Compensation start
Compensation end
Compensation spacing

Combined table with backlash value
Incremental
0.001 mm
As errors
47.0000 mm
47.0000 mm
287.0000 mm
30.0000 mm

Backlash value
-0.001 mm

Compensation values

No.      Axis position
         (mm)
1         47.0000
2         77.0000
3        107.0000
4        137.0000
5        167.0000
6        197.0000
7        227.0000
8        257.0000
9        287.0000

Combined
(0.001 mm)
0
-1
-1
-2
-1
-1
-1
-1
-1
```




FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM CAPTURED DATA TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 17:03:22
Axis: X
TITLE: Osa X 270 mm

Serial No: SL31101239
By: Fulova
Location: VUT FSI
Filename: meranie_3_8.rtl

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error mm
1	(+)	1	47.0000	47.0002	0.0002
1	(+)	2	77.0000	76.9995	-0.0005
1	(+)	3	107.0000	106.9979	-0.0021
1	(+)	4	137.0000	136.9964	-0.0036
1	(+)	5	167.0000	166.9945	-0.0055
1	(+)	6	197.0000	196.9947	-0.0053
1	(+)	7	227.0000	226.9937	-0.0063
1	(+)	8	257.0000	256.9909	-0.0091
1	(+)	9	287.0000	286.9913	-0.0087
2	(-)	9	287.0000	286.9906	-0.0094
2	(-)	8	257.0000	256.9913	-0.0087
2	(-)	7	227.0000	226.9919	-0.0081
2	(-)	6	197.0000	196.9924	-0.0076
2	(-)	5	167.0000	166.9941	-0.0059
2	(-)	4	137.0000	136.9952	-0.0048
2	(-)	3	107.0000	106.9969	-0.0031
2	(-)	2	77.0000	76.9974	-0.0026
2	(-)	1	47.0000	46.9990	-0.0010
3	(+)	1	47.0000	46.9996	-0.0004
3	(+)	2	77.0000	76.9988	-0.0012
3	(+)	3	107.0000	106.9977	-0.0023
3	(+)	4	137.0000	136.9953	-0.0047
3	(+)	5	167.0000	166.9957	-0.0043
3	(+)	6	197.0000	196.9934	-0.0066
3	(+)	7	227.0000	226.9933	-0.0067
3	(+)	8	257.0000	256.9912	-0.0088
3	(+)	9	287.0000	286.9910	-0.0090
4	(-)	9	287.0000	286.9909	-0.0091
4	(-)	8	257.0000	256.9905	-0.0095
4	(-)	7	227.0000	226.9910	-0.0090
4	(-)	6	197.0000	196.9935	-0.0065
4	(-)	5	167.0000	166.9948	-0.0052
4	(-)	4	137.0000	136.9950	-0.0050
4	(-)	3	107.0000	106.9971	-0.0029
4	(-)	2	77.0000	76.9982	-0.0018
4	(-)	1	47.0000	46.9995	-0.0005
5	(+)	1	47.0000	47.0002	0.0002
5	(+)	2	77.0000	77.0000	0.0000
5	(+)	3	107.0000	106.9983	-0.0017
5	(+)	4	137.0000	136.9957	-0.0043
5	(+)	5	167.0000	166.9955	-0.0045
5	(+)	6	197.0000	196.9942	-0.0058
5	(+)	7	227.0000	226.9920	-0.0080
5	(+)	8	257.0000	256.9916	-0.0084
5	(+)	9	287.0000	286.9904	-0.0096
6	(-)	9	287.0000	286.9892	-0.0108
6	(-)	8	257.0000	256.9906	-0.0094
6	(-)	7	227.0000	226.9926	-0.0074
6	(-)	6	197.0000	196.9936	-0.0064
6	(-)	5	167.0000	166.9937	-0.0063
6	(-)	4	137.0000	136.9955	-0.0045

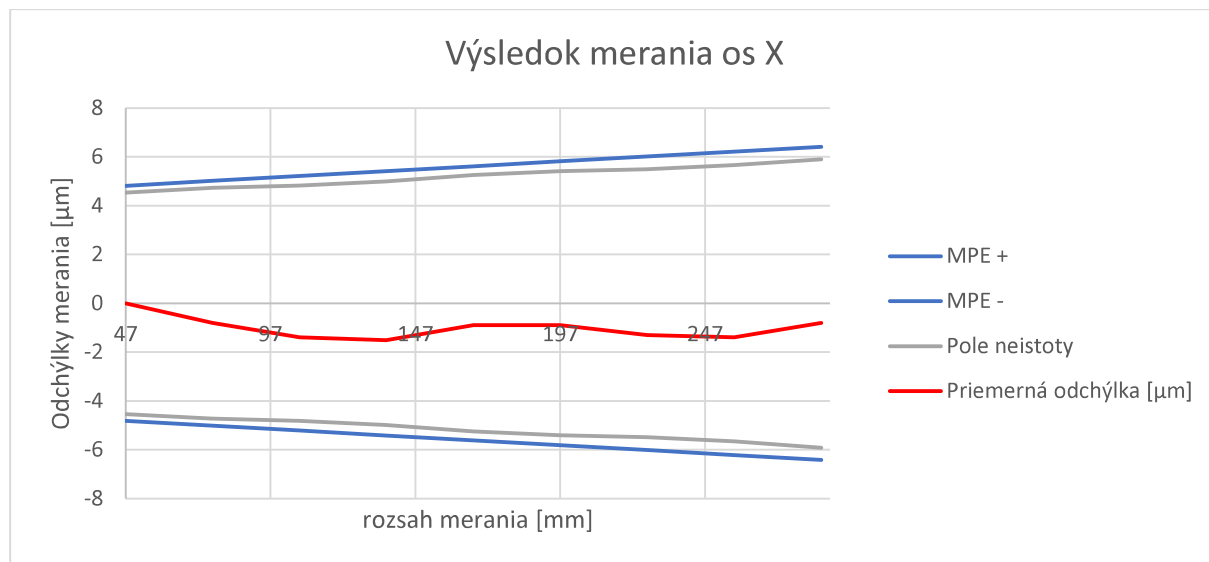


FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledek kalibrace os X:

Délka [mm]	Priemerná odchýlka [μm]	U [μm]
47	0	0,272443
77	-0,8	0,289137
107	-1,4	0,390478
137	-1,5	0,421337
167	-0,9	0,359556
197	-0,9	0,402422
227	-1,3	0,528311
257	-1,4	0,551331
287	-0,8	0,502799

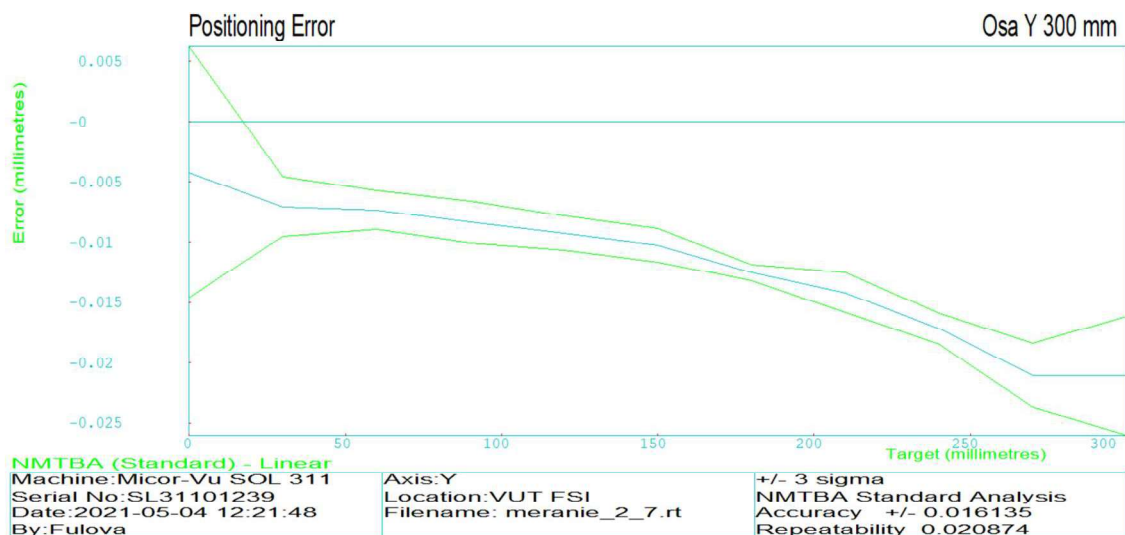




FAKULTA ústav výrobnch strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojnho inžinierstva, Ústav výrobnch strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

OS Y:



Pozn.:

Error – chyba (indikácia) prístroja, údaj prístroja mínus konvenčne prav hodnota

Modr krvka – aritmetick priemer všetkých hodnôt

Zelen krvka – dvojnásobok smerodajnej dochylky

Repeatability – opakovatelnos

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM ERROR COMPENSATION TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 12:21:48
Axis: Y
TITLE: Osa Y 300 mm

Serial No: SL31101239
By: Fuleva
Location: VUT FSI
Filename: meranie_2_7.rtl

Table type
Compensation type
Compensation resolution
Sign convention
Reference position
Compensation start
Compensation end
Compensation spacing

Combined table with backlash value
Incremental
0.001 mm
As errors
0.0000 mm
0.0000 mm
300.0000 mm
30.0000 mm

Backlash value

-0.001 mm

Compensation values

No.	Axis position (mm)	Combined (0.001 mm)
1	0.0000	0
2	30.0000	-3
3	60.0000	0
4	90.0000	-1
5	120.0000	-1
6	150.0000	-1
7	180.0000	-2
8	210.0000	-2
9	240.0000	-3
10	270.0000	-4
11	300.0000	0



FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

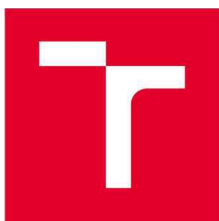
Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM CAPTURED DATA TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 12:21:48
Axis: Y
TITLE: Osa Y 300 mm

Serial No: SL31101239
By: Fulova
Location: VUT FSI
Filename: meranie_2_7.rtl

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error mm
1	(+)	1	0.0000	0.0004	0.0004
1	(+)	2	30.0000	29.9932	-0.0068
1	(+)	3	60.0000	59.9934	-0.0066
1	(+)	4	90.0000	89.9924	-0.0076
1	(+)	5	120.0000	119.9911	-0.0089
1	(+)	6	150.0000	149.9901	-0.0099
1	(+)	7	180.0000	179.9873	-0.0127
1	(+)	8	210.0000	209.9862	-0.0138
1	(+)	9	240.0000	239.9827	-0.0173
1	(+)	10	270.0000	269.9803	-0.0197
1	(+)	11	300.0000	299.9801	-0.0199
2	(-)	11	300.0000	299.9778	-0.0222
2	(-)	10	270.0000	269.9796	-0.0204
2	(-)	9	240.0000	239.9825	-0.0175
2	(-)	8	210.0000	209.9862	-0.0138
2	(-)	7	180.0000	179.9875	-0.0125
2	(-)	6	150.0000	149.9898	-0.0102
2	(-)	5	120.0000	119.9913	-0.0087
2	(-)	4	90.0000	89.9919	-0.0081
2	(-)	3	60.0000	59.9923	-0.0077
2	(-)	2	30.0000	29.9935	-0.0065
2	(-)	1	0.0000	-0.0065	-0.0065
3	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
3	(+)	2	30.0000	29.9939	-0.0061
3	(+)	3	60.0000	59.9923	-0.0077
3	(+)	4	90.0000	89.9917	-0.0083
3	(+)	5	120.0000	119.9909	-0.0091
3	(+)	6	150.0000	149.9903	-0.0097
3	(+)	7	180.0000	179.9875	-0.0125
3	(+)	8	210.0000	209.9864	-0.0136
3	(+)	9	240.0000	239.9831	-0.0169
3	(+)	10	270.0000	269.9784	-0.0216
3	(+)	11	300.0000	299.9798	-0.0202
4	(-)	11	300.0000	299.9771	-0.0229
4	(-)	10	270.0000	269.9779	-0.0221
4	(-)	9	240.0000	239.9835	-0.0165
4	(-)	8	210.0000	209.9850	-0.0150
4	(-)	7	180.0000	179.9877	-0.0123
4	(-)	6	150.0000	149.9899	-0.0101
4	(-)	5	120.0000	119.9906	-0.0094
4	(-)	4	90.0000	89.9908	-0.0092
4	(-)	3	60.0000	59.9922	-0.0078
4	(-)	2	30.0000	29.9933	-0.0067
4	(-)	1	0.0000	-0.0064	-0.0064
5	(+)	1	0.0000	-0.0053	-0.0053
5	(+)	2	30.0000	29.9921	-0.0079
5	(+)	3	60.0000	59.9933	-0.0067
5	(+)	4	90.0000	89.9920	-0.0080
5	(+)	5	120.0000	119.9899	-0.0101
5	(+)	6	150.0000	149.9891	-0.0109
5	(+)	7	180.0000	179.9876	-0.0124

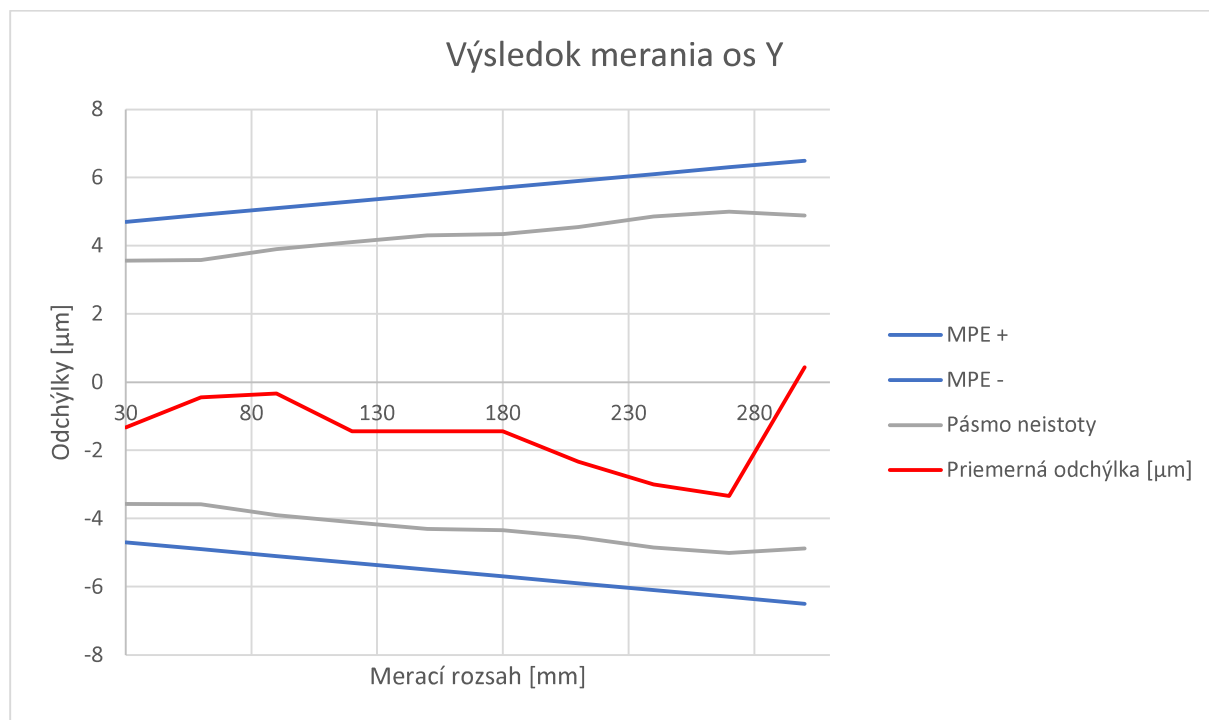


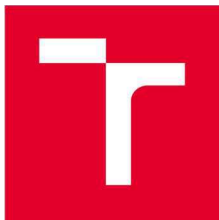
FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledek kalibrace os Y:

Délka [mm]	Přeměrná odchylka [μm]	U [μm]
30	-1,33333	1,13398
60	-0,44444	1,317141
90	-0,33333	1,200188
120	-1,44444	1,189406
150	-1,44444	1,198617
180	-1,44444	1,355128
210	-2,33333	1,34835
240	-3	1,247012
270	-3,33333	1,298526
300	0,44444	1,618325

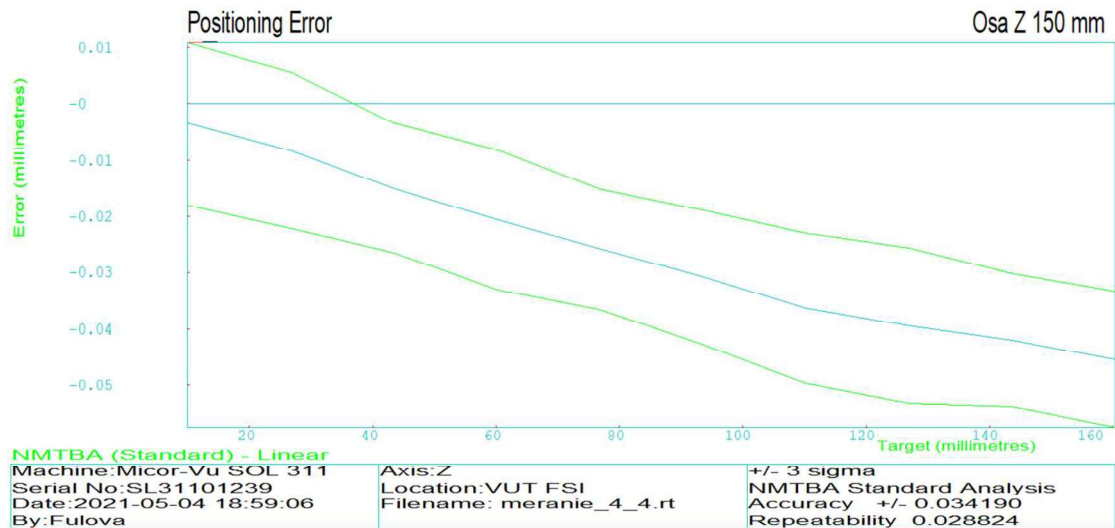




FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

OS Z:



Pozn.:

Error – chyba (indikácia) prístroja, údaj prístroja mínus konvenčne pravá hodnota

Modrá krivka – aritmetický priemer všetkých hodnôt

Zelená krivka – dvojnásobok smerodajnej dochýlky

Repeatability – opakovateľnosť

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM ERROR COMPENSATION TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 18:59:06
Axis: Z
TITLE: Osa Z 150 mm

Serial No: SL31101239
By: Fulova
Location: VUT FSI
Filename: meranie_4_4.rtl

Table type
Compensation type
Compensation resolution
Sign convention
Reference position
Compensation start
Compensation end
Compensation spacing

Combined table with backlash value
Incremental
0.001 mm
As errors
10.0000 mm
10.0000 mm
160.3360 mm
16.7040 mm

Backlash value

-0.002 mm

Compensation values

No.	Axis position (mm)
1	10.0000
2	26.7040
3	43.4080
4	60.1120
5	76.8160
6	93.5200
7	110.2240
8	126.9280
9	143.6320
10	160.3360

Combined (0.001 mm)
0
-5
-6
-6
-5
-5
-6
-3
-2
-4



FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

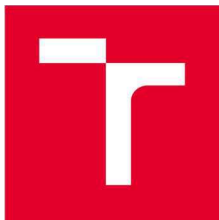
Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM CAPTURED DATA TABLE

Machine: Micor-Vu SOL 311
Date: 2021-05-04 18:59:06
Axis: Z
TITLE: Osa Z 150 mm

Serial No: SL31101239
By: Fulova
Location: VUT FSI
Filename: meranie_4_4.rtl

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error mm
1	(+)	1	10.0000	10.0007	0.0007
1	(+)	2	26.7040	26.6994	-0.0046
1	(+)	3	43.4080	43.3962	-0.0118
1	(+)	4	60.1120	60.0940	-0.0180
1	(+)	5	76.8160	76.7929	-0.0231
1	(+)	6	93.5200	93.4911	-0.0289
1	(+)	7	110.2240	110.1910	-0.0330
1	(+)	8	126.9280	126.8924	-0.0356
1	(+)	9	143.6320	143.5936	-0.0384
1	(+)	10	160.3360	160.2946	-0.0414
2	(-)	10	160.3360	160.2941	-0.0419
2	(-)	9	143.6320	143.5941	-0.0379
2	(-)	8	126.9280	126.8927	-0.0353
2	(-)	7	110.2240	110.1916	-0.0324
2	(-)	6	93.5200	93.4919	-0.0281
2	(-)	5	76.8160	76.7932	-0.0228
2	(-)	4	60.1120	60.0941	-0.0179
2	(-)	3	43.4080	43.3958	-0.0122
2	(-)	2	26.7040	26.6989	-0.0051
2	(-)	1	10.0000	9.9986	-0.0014
3	(+)	1	10.0000	9.9991	-0.0009
3	(+)	2	26.7040	26.6976	-0.0064
3	(+)	3	43.4080	43.3944	-0.0136
3	(+)	4	60.1120	60.0938	-0.0182
3	(+)	5	76.8160	76.7909	-0.0251
3	(+)	6	93.5200	93.4910	-0.0290
3	(+)	7	110.2240	110.1895	-0.0345
3	(+)	8	126.9280	126.8901	-0.0379
3	(+)	9	143.6320	143.5907	-0.0413
3	(+)	10	160.3360	160.2918	-0.0442
4	(-)	10	160.3360	160.2917	-0.0443
4	(-)	9	143.6320	143.5912	-0.0408
4	(-)	8	126.9280	126.8898	-0.0382
4	(-)	7	110.2240	110.1889	-0.0351
4	(-)	6	93.5200	93.4902	-0.0298
4	(-)	5	76.8160	76.7908	-0.0252
4	(-)	4	60.1120	60.0920	-0.0200
4	(-)	3	43.4080	43.3931	-0.0149
4	(-)	2	26.7040	26.6958	-0.0082
4	(-)	1	10.0000	9.9968	-0.0032
5	(+)	1	10.0000	9.9964	-0.0036
5	(+)	2	26.7040	26.6960	-0.0080
5	(+)	3	43.4080	43.3928	-0.0152
5	(+)	4	60.1120	60.0914	-0.0206
5	(+)	5	76.8160	76.7899	-0.0261
5	(+)	6	93.5200	93.4896	-0.0304
5	(+)	7	110.2240	110.1849	-0.0391
5	(+)	8	126.9280	126.8848	-0.0432
5	(+)	9	143.6320	143.5856	-0.0464
5	(+)	10	160.3360	160.2855	-0.0505
6	(-)	10	160.3360	160.2857	-0.0503

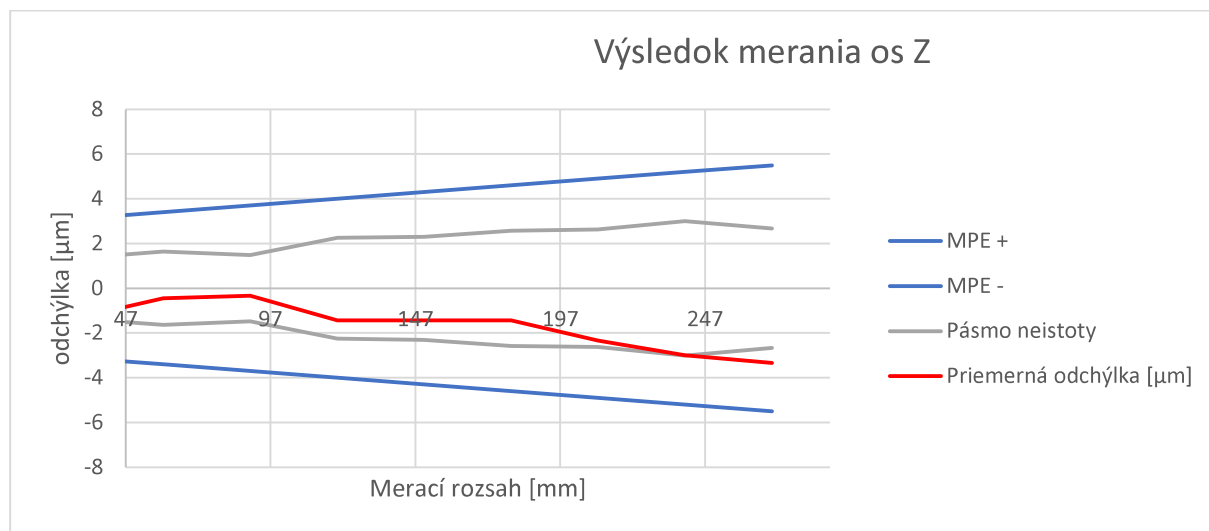


FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Pracovisko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledok merania os Z:

Délka [mm]	Priemerná odchýlka [μm]	U [μm]
30	-1,33333	1,75604
60	-0,44444	2,218267
90	-0,33333	1,741323
120	-1,44444	1,995159
150	-1,44444	2,024654
180	-1,44444	2,269485
210	-2,33333	2,190132
240	-3	2,82726
270	-3,33333	3,365432
300	0,444444	3,353632



Dátum kalibrácie: 20.03.2021

Kalibráciu vykonala: Bc. Silvia Fulová

Príloha G

Menovitá hodnota	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99
1	8,9994	19,0041	28,9972	39,0040	48,9895	58,9979	68,9960	78,9874	88,9978	98,9776
2	8,9997	19,0034	28,9978	38,9937	48,9963	59,0059	68,9987	78,9913	88,9976	98,9877
3	8,9991	18,9995	28,9982	38,9993	48,9962	58,9887	68,9896	79,0050	88,9892	98,9774
4	8,9978	19,0037	28,9953	38,9971	48,9983	59,0040	68,9964	78,9855	88,9941	98,9879
5	9,0001	19,0033	28,9974	38,9891	48,9975	59,0035	68,9861	78,9941	88,9877	98,9880
6	8,9996	19,0002	28,9990	38,9946	48,9986	58,9959	69,0049	79,0016	88,9848	98,9990
7	8,9981	19,0028	29,0006	38,9983	48,9963	59,0054	68,9973	78,9964	88,9786	98,9773
8	8,9991		29,0008	38,9938	48,9914	59,0018	68,9965	78,9931	88,9986	98,9718
9	8,9986	19,0018	28,9951	38,9964	48,9949	58,9967	68,9873	79,0022	88,9976	98,9806
10	8,9990	19,0053	28,9941	38,9961	48,9957	59,0013	68,9979	78,9898	88,9854	98,9817
Priemer[mm]	8,9990	19,0027	28,9975	38,9963	48,9955	59,0001	68,9951	78,9946	88,9911	98,9829
s(x) [mm]	0,0007	0,0019	0,0023	0,0040	0,0029	0,0053	0,0057	0,0066	0,0070	0,0078
ua [μm]	0,2263	0,6269	0,7153	1,3173	0,9193	1,6859	1,8160	2,0796	2,2068	2,4786
ue [μm]	0,0545	0,0595	0,0645	0,0695	0,0745	0,0795	0,0845	0,0895	0,0945	0,0995
up [μm]	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577
udt [μm]	0,0122	0,0257	0,0392	0,0527	0,0662	0,0797	0,0932	0,1067	0,1202	0,1337
ud20[μm]	0,0304	0,0642	0,0979	0,1317	0,1655	0,1993	0,2330	0,2668	0,3006	0,3343
ub	0,0859	0,1079	0,1365	0,1682	0,2016	0,2360	0,2710	0,3065	0,3421	0,3780
uc	0,2421	0,6362	0,7282	1,3280	0,9411	1,7023	1,8361	2,1021	2,2331	2,5072
U [μm]	0,4841	1,2723	1,4565	2,6559	1,8822	3,4047	3,6722	4,2041	4,4663	5,0145

Príloha H

Menovitá hodnota[m]	30,0000	60,0000	90,0000	120,0000	150,0000	180,0000	210,0000	240,0000	270,0000	300,0000
1	29,9997	60,0010	89,9997	120,0001	149,9992	180,0002	209,9987	240,0001	269,9989	299,9982
2	29,9998	60,0005	89,9999	119,9998	150,0000	179,9992	209,9994	239,9987	269,9983	299,9981
3	29,9990	59,9999	90,0000	119,9985	149,9994	179,9985	209,9975	239,9970	269,9989	299,9971
4	30,0008	60,0012	90,0000	120,0005	150,0007	180,0004	210,0001	239,9990	269,9998	300,0003
5	29,9991	59,9995	89,9988	120,0001	149,9995	179,9982	209,9986	239,9970	269,9968	299,9977
6	30,0000	59,9998	89,9999	119,9997	149,9999	179,9995	209,9991	239,9985	269,9977	299,9973
7	29,9994	59,9995	89,9991	119,9992	149,9989	179,9984	209,9992	240,0002	269,9989	299,9971
8	29,9998	60,0004	89,9996	120,0003	150,0002	180,0008	209,9994	239,9983	269,9981	299,9972
9	30,0004	60,0010	89,9996	120,0007	149,9996	180,0007	209,9993	239,9996	269,9996	299,9980
10	29,9997	60,0002	89,9993	120,0002	149,9998	179,9988	209,9982	239,9981	269,9986	299,9972
Priemer[mm]	29,9998	60,0003	89,9996	119,9999	149,9997	179,9995	209,9990	239,9987	269,9986	299,9978
s(x) [mm]	0,0006	0,0006	0,0004	0,0007	0,0005	0,0010	0,0007	0,0011	0,0009	0,0010
ua [μm]	0,1750	0,1973	0,1260	0,2067	0,1619	0,3117	0,2293	0,3538	0,2772	0,3068
ue [μm]	0,2650	0,2800	0,2950	0,3100	0,3250	0,3400	0,3550	0,3700	0,3850	0,4000
up [μm]	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577
udt [μm]	0,0312	0,0624	0,0935	0,1247	0,1559	0,1871	0,2182	0,2494	0,2806	0,3118
ud20 [μm]	0,6391	1,2783	1,9174	2,5565	3,1956	3,8347	4,4739	5,1130	5,7521	6,3912
ub [μm]	0,6950	1,3113	1,9430	2,5789	3,2164	3,8548	4,4936	5,1327	5,7721	6,4116
uc [μm]	0,7167	1,3261	1,9471	2,5872	3,2205	3,8673	4,4994	5,1449	5,7787	6,4189
U [μm]	1,4334	2,6522	3,8942	5,1743	6,4410	7,7347	8,9989	10,2898	11,5575	12,8378

Príloha H

Menovitá hodnota[m m]	30,0000	60,0000	90,0000	120,0000	150,0000	180,0000	210,0000	240,0000	270,0000	300,0000
1	29,9976	59,9972	89,9960	119,9965	149,9949	179,9950	209,9947	239,9955	269,9958	299,9921
2	29,9985	59,9972	89,9977	119,9965	149,9954	179,9951	209,9948	239,9964	269,9970	299,9918
3	29,9986	59,9979	89,9973	119,9967	149,9955	179,9967	209,9950	239,9973	269,9969	299,9917
4	29,9984	59,9981	89,9984	119,9963	149,9952	179,9959	209,9947	239,9963	269,9960	299,9928
5	29,9984	59,9985	89,9975	119,9991	149,9968	179,9978	209,9964	239,9962	269,9979	299,9934
6	29,9995	59,9992	89,9980	119,9989	149,9968	179,9968	209,9965	239,9967	269,9983	299,9932
7	29,9996	59,9989	89,9988	119,9990	149,9983	179,9968	209,9971	239,9976	269,9975	299,9934
8	29,9987	59,9983	89,9989	119,9978	149,9971	179,9967	209,9961	239,9971	269,9975	299,9932
9	29,9998	59,9996	89,9984	119,9992	149,9989	179,9979	209,9970	239,9985	269,9988	299,9937
10	29,9998	60,0000	89,9987	119,9989	149,9972	179,9964	209,9982	239,9982	269,9979	299,9936
Priemer[mm]	29,9989	59,9985	89,9980	119,9979	149,9966	179,9965	209,9960	239,9970	269,9974	299,9929
s(x) [mm]	0,0007	0,0009	0,0009	0,0013	0,0013	0,0010	0,0012	0,0009	0,0010	0,0008
ua [μm]	0,2325	0,2998	0,2842	0,4019	0,4224	0,3073	0,3863	0,2982	0,3012	0,2381
ue [μm]	0,2650	0,2800	0,2950	0,3100	0,3250	0,3400	0,3550	0,3700	0,3850	0,4000
up [μm]	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577
udt [μm]	0,0312	0,0624	0,0935	0,1247	0,1559	0,1871	0,2182	0,2494	0,2806	0,3118
ud20 [μm]	0,6391	1,2782	1,9173	2,5565	3,1956	3,8347	4,4738	5,1129	5,7521	6,3911
ub [μm]	0,6950	1,3113	1,9430	2,5789	3,2163	3,8547	4,4935	5,1327	5,7721	6,4115
uc [μm]	0,7328	1,3451	1,9637	2,6100	3,2440	3,8669	4,5101	5,1414	5,7799	6,4159
U [μm]	1,4657	2,6902	3,9274	5,2200	6,4879	7,7339	9,0202	10,2827	11,5598	12,8318

Príloha J

Menovitá hodnota [mm]	47	77	107	137	167	197	227	257	287
1	47,0000	77,0028	107,0011	136,9997	166,9950	196,9980	226,9960	256,9976	286,9946
2	46,9998	76,9991	106,9987	136,9964	166,9949	196,9949	226,9929	256,9907	286,9910
3	47,0000	76,9992	106,9986	136,9960	166,9968	196,9941	226,9936	256,9918	286,9902
4	46,9991	76,9996	106,9985	136,9968	166,9956	196,9951	226,9926	256,9903	286,9905
5	46,9998	76,9989	106,9975	136,9968	166,9956	196,9949	226,9939	256,9910	286,9906
6	46,9996	76,9998	106,9981	136,9961	166,9946	196,9935	226,9941	256,9925	286,9900
7	47,0000	76,9999	106,9979	136,9964	166,9953	196,9942	226,9945	256,9927	286,9902
8	47,0002	76,9995	106,9979	136,9964	166,9945	196,9947	226,9937	256,9909	286,9913
9	47,0001	76,9990	106,9977	136,9970	166,9941	196,9945	226,9929	256,9926	286,9907
10	46,9991	77,0000	106,9975	136,9970	166,9959	196,9953	226,9932	256,9931	286,9911
11	47,0009	77,0007	106,9985	136,9981	166,9968	196,9968	226,9955	256,9936	286,9934
12	46,9993	76,9997	106,9970	136,9972	166,9951	196,9937	226,9932	256,9916	286,9914
13	47,0000	76,9994	106,9984	136,9957	166,9956	196,9937	226,9925	256,9908	286,9902
14	46,9993	76,9996	106,9989	136,9957	166,9958	196,9934	226,9926	256,9909	286,9930
15	46,9996	76,9994	106,9984	136,9961	166,9950	196,9961	226,9934	256,9912	286,9902
16	47,0002	76,9992	106,9982	136,9963	166,9944	196,9938	226,9938	256,9921	286,9904
17	46,9995	76,9999	106,9978	136,9961	166,9957	196,9947	226,9929	256,9925	286,9907
18	46,9996	76,9988	106,9977	136,9953	166,9957	196,9934	226,9933	256,9912	286,9910
19	46,9997	76,9999	106,9982	136,9965	166,9965	196,9953	226,9926	256,9921	286,9891
Priemer[mm]	46,9997	76,9996	106,9982	136,9965	166,9954	196,9947	226,9934	256,9920	286,9907
s(x) [mm]	0,0005	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007	0,0011	0,0009	0,0018	0,0011
ua [μm]	0,0831	0,1286	0,1243	0,1485	0,1228	0,1912	0,1544	0,3152	0,2053
ue [μm]	0,0220	0,0360	0,0501	0,0641	0,0782	0,0922	0,1062	0,1203	0,1343
up [μm]	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577
udt [μm]	0,0635	0,0800	0,1112	0,1424	0,1735	0,2047	0,2359	0,2671	0,2982
ud20[μm]	1,3017	1,6404	2,2795	2,9186	3,5577	4,1968	4,8359	5,4750	6,1141
ub	1,3047	1,6438	2,2835	2,9233	3,5633	4,2032	4,8432	5,4831	6,1231
uc	1,3073	1,6488	2,2869	2,9271	3,5654	4,2076	4,8456	5,4922	6,1266
U [μm]	2,6147	3,2976	4,5738	5,8542	7,1308	8,4151	9,6913	10,9844	12,2531

Príloha K

Menovitá hodnota [mm]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
1	-0,0027	29,997	59,997	89,9961	119,995	149,9937	179,9935	209,9919	239,9887	269,9845	299,9842
2	-0,0069	29,9921	59,9917	89,9921	119,9897	149,9899	179,9868	209,9847	239,9822	269,9785	299,9769
3	-0,0024	29,9981	59,9973	89,9963	119,9946	149,994	179,9933	209,9905	239,987	269,9846	299,9837
4	-0,0011	29,9982	59,9973	89,9968	119,9957	149,9948	179,9929	209,9902	239,9869	269,9833	299,9833
5	-0,0016	29,9974	59,9974	89,9953	119,9947	149,994	179,992	209,9904	239,9861	269,9825	299,9821
6	-0,0065	29,9935	59,9923	89,9919	119,9913	149,9898	179,9875	209,9862	239,9825	269,9796	299,9778
7	-0,0064	29,9933	59,9922	89,9908	119,9906	149,9899	179,9877	209,985	239,9835	269,9779	299,9771
8	-0,0074	29,9918	59,9926	89,9912	119,9908	149,9893	179,9871	209,9854	239,9823	269,9785	299,9775
9	-0,0055	29,9936	59,9917	89,9923	119,9903	149,9887	179,9863	209,9844	239,9812	269,9786	299,977
10	-0,0055	29,9932	59,9931	89,9919	119,9914	149,9903	179,9881	209,9861	239,9833	269,9798	299,9804
11	0	29,9979	60,0002	89,9989	119,9971	149,9962	179,9951	209,9929	239,9901	269,9865	299,9872
12	-0,0058	29,9934	59,9926	89,9928	119,9904	149,9894	179,9872	209,9863	239,9821	269,9783	299,9818
13	0,0004	29,9989	59,9987	89,9974	119,9957	149,9946	179,9925	209,9908	239,9872	269,9839	299,986
14	-0,0006	29,9982	59,9995	89,9974	119,9957	149,9943	179,9927	209,9914	239,9879	269,9851	299,9854
15	-0,0013	29,9967	59,9963	89,9961	119,9953	149,9941	179,9914	209,9899	239,9872	269,9833	299,9881
16	0,0004	29,9932	59,9934	89,9924	119,9911	149,9901	179,9873	209,9862	239,9827	269,9803	299,9801
17	0	29,9939	59,9923	89,9917	119,9909	149,9903	179,9875	209,9864	239,9831	269,9784	299,9784
18	-0,0053	29,9921	59,992	89,992	119,9899	149,9891	179,9876	209,9856	239,9829	269,979	299,9811
19	-0,0056	29,993	59,9926	89,9915	119,9895	149,9883	179,987	209,9844	239,9821	269,9795	299,9796
Priemer[mm]	-0,00353	29,9949	59,99464	89,99377	119,9925	149,9914	179,9895	209,9876	239,9846	269,981	299,9813
s(x) [mm]	0,00285	0,00252	0,00293	0,00266	0,00264	0,00265	0,00300	0,00297	0,00273	0,00284	0,00355
ua [μm]	0,63813	0,56387	0,65543	0,59582	0,58922	0,59238	0,66982	0,66447	0,61058	0,63423	0,79479
ue [μm]	0,00000	0,01404	0,02808	0,04212	0,05616	0,07020	0,08424	0,09828	0,11232	0,12636	0,14040
up [μm]	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774
udt [μm]	0,00000	0,03117	0,06235	0,09352	0,12470	0,15588	0,18705	0,21823	0,24940	0,28057	0,31175
ud20[μm]	-0,00010	0,63902	1,27814	1,91725	2,55635	3,19545	3,83454	4,47362	5,11269	5,75174	6,39087
ub	0,05774	0,64253	1,28127	1,92086	2,56065	3,20054	3,84045	4,48039	5,12032	5,76025	6,40027
uc	0,64073	0,85486	1,43918	2,01114	2,62757	3,25490	3,89843	4,52940	5,15660	5,79506	6,44943
U [μm]	1,281464	1,709729	2,878362	4,022287	5,255141	6,509801	7,796858	9,058795	10,3132	11,59012	12,89886

Príloha L

Menovitá hodnota [mm]	12,0000	27,0000	42,0000	57,0000	72,0000	87,0000	102,0000	117,0000	132,0000	147,0000
1	11,9984	26,9938	41,9876	56,9826	71,9774	86,9726	101,9673	116,9648	131,9612	146,9580
2	11,9835	26,9779	41,9720	56,9643	71,9592	86,9555	101,9510	116,9462	131,9435	146,9419
3	11,9683	26,9628	41,9568	56,9519	71,9464	86,9409	101,9357	116,9328	131,9316	146,9275
4	11,9558	26,9510	41,9443	56,9393	71,9337	86,9294	101,9248	116,9213	131,9176	146,9136
5	11,9347	26,9307	41,9246	56,9187	71,9142	86,9089	101,9046	116,9001	131,8972	146,8954
6	11,9305	26,9224	41,9170	56,9112	71,9073	86,9013	101,8985	116,8943	131,8913	146,8879
7	12,0007	26,9954	41,9882	56,9820	71,9769	86,9711	101,9670	116,9644	131,9616	146,9586
8	11,9991	26,9936	41,9864	56,9818	71,9749	86,9710	101,9655	116,9621	131,9587	146,9558
9	11,9842	26,9798	41,9753	56,9707	71,9659	86,9621	101,9578	116,9552	131,9527	146,9578
10	11,9679	26,9644	41,9615	56,9586	71,9563	86,9538	101,9493	116,9461	131,9435	146,9415
11	11,9576	26,9537	41,9466	56,9486	71,9435	86,9403	101,9353	116,9320	131,9292	146,9266
12	11,9823	26,9312	41,9303	56,9278	71,9225	86,9182	101,9154	116,9121	131,9150	146,9136
13	11,9902	26,9258	41,9236	56,9184	71,9129	86,9075	101,9036	116,8998	131,8974	146,8950
14	11,9764	26,9221	41,9452	56,9121	71,9056	86,9008	101,8958	116,8932	131,8905	146,8882
15	11,9996	26,9949	41,9878	56,9821	71,9772	86,9719	101,9676	116,9647	131,9621	146,9581
16	11,9884	26,9918	41,9851	56,9800	71,9748	86,9702	101,9649	116,9618	131,9592	146,9557
17	11,9856	26,9772	41,9711	56,9646	71,9594	86,9547	101,9497	116,9463	131,9434	146,9404
18	11,9810	26,9749	41,9685	56,9634	71,9558	86,9512	101,9458	116,9424	131,9388	146,9370
19	11,9767	26,9712	41,9668	56,9595	71,9541	86,9488	101,9444	116,9417	131,9395	146,9353
Priemer[mm]	11,9779	26,9690	41,9645	56,9583	71,9533	86,9485	101,9438	116,9406	131,9380	146,9353
s(x) [mm]	0,0187	0,0232	0,0210	0,0222	0,0222	0,0224	0,0220	0,0222	0,0219	0,0219
ua [µm]	3,5271	4,3898	3,9711	4,1908	4,2029	4,2244	4,1548	4,1991	4,1406	4,1442
ue [µm]	0,0056	0,0126	0,0197	0,0267	0,0337	0,0407	0,0477	0,0548	0,0618	0,0688
up [µm]	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577	0,0577
udt [µm]	0,0162	0,0364	0,0567	0,0770	0,0972	0,1175	0,1377	0,1580	0,1782	0,1985
ud20[µm]	0,3317	0,7469	1,1622	1,5775	1,9928	2,4081	2,8234	3,2387	3,6541	4,0694
ub	0,3372	0,7501	1,1652	1,5806	1,9963	2,4120	2,8277	3,2436	3,6594	4,0753
uc	3,5432	4,4534	4,1385	4,4790	4,6529	4,8645	5,0258	5,3060	5,5259	5,8123
U [µm]	7,0863	8,9068	8,2769	8,9580	9,3058	9,7290	10,0516	10,6120	11,0518	11,6245